

**УДК 621.327; 635.21; 633.1**

**номер державної реєстрації: 0115U006063**

**ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД УКООПСІЛКИ  
«ПОЛТАВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ»**

**вул. Ковалю, 3, Полтава 36014; тел./факс.: (0532) 50-91-70**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Ректор ВНЗ Укоопспілки «Полтавський  
університет**

**економіки і торгівлі»**

\_\_\_\_\_ д.і.н., проф. Нестуля О.О.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗВІТ**

**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**УЛЬТРАФІОЛЕТОВІ ОПРОМІНЮВАЛЬНІ УСТАНОВКИ  
ФОТОБІОЛОГІЧНОЇ ДІЇ: ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОПРОМІНЮВАННЯ  
СИПУЧИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ТА НАСІННЯ  
СІЛЬГОСПКУЛЬТУР**

**Керівник науково-дослідної теми  
к.ф.-м.н., доцент**

\_\_\_\_\_ **А.О. Семенов**

**ПОЛТАВА-2019**

## СПИСОК АВТОРІВ

## Виконавці:

доцент кафедри товарознавства, біотехнології, експертизи та митної справи к.фіз.-мат.н. ВНЗУ «ПУЕТ»	<hr/> 08.04.2019	А.О. Семенов (вступ, реферат, розділи 1, 2, 3, 4, 5, висновки)
професор кафедри товарознавства, біотехнології, експертизи та митної справи ВНЗУ «ПУЕТ», д.т.н.	<hr/> 08.04.2019	Г.М. Кожушко (розділи 1, 2, 3, 4, 5)
професор кафедри товарознавства, біотехнології, експертизи та митної справи ВНЗУ «ПУЕТ», д.х.н.	<hr/> 08.04.2019	Т. В. Сахно (розділи 4, 5)

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ДЖЕРЕЛ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ	11
1.1 Розрядні джерела УФ-випромінювання	11
1.1.1 Ртутні лампи низького тиску	11
1.1.2 Ртутні лампи високого тиску	21
1.1.3 Металогалогенні лампи високого тиску	32
1.2 Безелектродні джерела УФ-випромінювання	37
1.3 Амальгамні джерела УФ-випромінювання	39
1.4 Ксенонові джерела УФ-випромінювання	45
1.5 Ексімерні джерела УФ-випромінювання	51
1.6 Напівпровідникові діоди	58
Висновки до розділу	60
РОЗДІЛ 2 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛАМП І ЛАМПОВИХ СИСТЕМ	63
2.1 Методика вимірювання потужності УФ-випромінювання ламп низького тиску	63
2.2 Методика контролю потоку випромінювання бактерицидних ламп в процесі їх експлуатації	67
Висновки до розділу	71
РОЗДІЛ 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПОЖИВНИХ ПЕРЕВАГ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ УФ-ДЖЕРЕЛ СВІТЛА В РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ	72
3.1 Прогнозування корисного строку служби ультрафіолетових ламп низького тиску за стабільністю променевого потоку	72
3.2 Переваги та недоліки використання імпульсних електророзрядних	

УФ-джерел світла в різних технологічних процесах	78
Висновки до розділу	95
РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ УФ-ОПРОМІНЮВАННЯ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ	96
4.1 Аналіз ролі УФ-випромінювання на розвиток і продуктивність різних культур	96
4.1.1 Вплив УФ-В радіації на рослини	106
4.1.2 Застосування УФ-опромінення в боротьбі з хворобами рослин	108
4.2 Вплив передпосадкового УФ-опромінення на розвиток і продуктивність картоплі	110
4.3 Вплив передпосівного ультрафіолетового опромінення насіння ріпаку на розвиток рослин	115
4.4 Ефективність проростання насіння ріпаку при передпосівному опроміненні його УФ-випромінюванням різного спектрального складу	118
4.5 Вплив ультрафіолетового випромінювання на проростання, схожість та ростові процеси насіння пшениці	123
4.6 Вплив УФ-випромінювання на передпосівні властивості моркви різних сортів	130
Висновки до розділу	137
РОЗДІЛ 5 ВИКОРИСТАННЯ УФ-ОПРОМІНЕННЯ ДЛЯ МІКРОБІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ АКТИВОВАНОГО ВУГІЛЛЯ ТА СИПУЧИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ	140
5.1 Спосіб мікробіологічного очищення активованого вугілля УФ-опроміненням	140
5.2 Спосіб бактерицидного знезараження сипучих продуктів харчування	143
Висновки до розділу	151
ВИСНОВКИ	152
Перелік джерел посилань	154

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВУФ – вакуумний ультрафіолет

ГДК – гранично допустима концентрація

ДБ – дугова бактерицидна

ДНК – дезоксирибонуклеїнова кислота

ДРБ – дугова ртутна бактерицидна

ДРТ – дугова ртутна трубчаста

ЕПРА – електронний пускорегулюючий апарат

ІЧВ – інфрачервоне випромінювання

ККД – коефіцієнт корисної дії

КУО – колонієутворюючі одиниці

ЛЕ – лампи еритемні

ЛУФ – лампи ультрафіолетові

МГЛ – металогалогенна лампа

МЕК – Міжнародна електротехнічна комісія

МКО – Міжнародна комісія з освітлення

НДР – науково-дослідна робота

ОУ – опромінювальна установка

ПРА – пускорегулюючий апарат

СВД – світловипромінювальні діоди

УФ – ультрафіолет

УФ-А – ультрафіолетове випромінювання в області 315-400 нм

УФ-В – ультрафіолетове випромінювання в області 280-315 нм

УФ-С – ультрафіолетове випромінювання в області 280-100 нм

ФАР – фотосинтетично активна радіація

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 175 с., 5 ч., 23 таблиці, 32 рисунки, 201 джерел посилання.

УЛЬТРАФІОЛЕТ, УФ-ОПРОМІНЕННЯ, ДОЗА ОПРОМІНЕННЯ, БАКТЕРИЦИДНЕ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ, МІКРОБІОЛОГІЧНЕ ОЧИЩЕННЯ, ІНАКТИВАЦІЯ, ЕНЕРГІЯ ПРОРОСТАННЯ, СХОЖІСТЬ, АКТИВОВАНЕ ВУГІЛЛЯ, НАСІННЯ СІЛЬГОСПКУЛЬТУР.

Об'єкти дослідження: сипучі харчові продукти з розміром частинок до 50 мкм, активоване вугілля торгової марки «Сілкарбон», насіння сільгоспкультур: пшениці, ріпаку, моркви та клубні картоплі.

Мета роботи - дослідження ефективності ультрафіолетового випромінювання в різних технологічних процесах: бактерицидне знезараження сипучих продуктів, мікробіологічне очищення активованого вугілля; передпосівна обробка насіння сільгоспкультур та передпосадкова обробка клубнів картоплі.

Методи дослідження: Використовували стандартні методики вимірювання спектральної густини опроміненості та вимірювання спектральної густини енергетичної яскравості і повного потоку ультрафіолетових ламп згідно із ДСТУ СІЕ 63:2017 «Спектрорадіометричні вимірювання джерел світла»).

Вимірювання доз УФ-опромінення в різних енергетичних областях ультрафіолетового діапазону здійснювали за допомогою радіометра «Тензор-31» відповідно до методики МВУ 11-038-2007 «Джерела ультрафіолетового випромінювання. Методика виконання вимірювань параметрів ультрафіолетового випромінювання».

Енергію проростання та схожість насіння сільгоспкультур визначали згідно із ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості.

Кількість дріжджових та плісневих грибів визначали відповідно до «Методики контролю якості», Державної фармакопеї України.

Обробку результатів вимірювання проводили з використанням теорії похибок та методів математичної статистики.

В роботі проведено аналіз джерел УФ-випромінювання: розрядні лампи низького та високого тиску, металогалогенні, безелектродні, амальгамні, ксенонові, ексімерні лампи та напівпровідникові діоди.

Серед різних типів джерел УФ-випромінювання ртутні розрядні лампи отримали найбільш широке застосування, оскільки розряд в парах ртуті випромінює в усіх діапазонах УФ-спектру. Ртуть має високу потужність пару, що дозволяє створити конструкції ламп для різних технологічних процесів з тиском пару від 1,3 Па до  $1,3 \cdot 10^6$  Па, ртуть хімічно мало активна і майже не взаємодіє з матеріалами колби та електродів, що забезпечує досить високу надійність і строк служби ламп. Критерієм не відповідності УФ-ламп в опромінювальних установках є зниження їх потоку нижче 50 % від номінального значення при номінальній напрузі мережі, а також їх нестійке горіння.

Запропонована методика оцінки корисного строку служби ультрафіолетових ламп низького тиску в фотобіологічних і фотохімічних процесах. Корисний строк служби УФ-ламп в діапазоні спектру УФ-С можна оцінювати по незавершених випробуваннях після 2500-3000 год. за результатами спаду променевого потоку з точністю до  $\pm 3$  %.

Показано, що інтенсивність багатьох фізіологічних процесів, формування рослин і продуктивність культур істотно визначається довгохвильовим і середньохвильовим ультрафіолетом. Частка УФ-випромінювання в довгохвильовій і середньохвильовій області спектру, не повинна перевищувати 3-4% від рівня ФАР.

Застосування УФ-опромінення в передпосівній обробці насіння сільськогосподарських культур стимулює зростання, підвищує стійкість рослин до зовнішніх чинників і збільшується врожайність. В рослинах ріпаку та пшениці, насіння яких було опромінено дозами УФ-С 50-240 Дж/м<sup>2</sup> та 400-600 Дж/м<sup>2</sup>, відповідно, збільшується енергія проростання, підвищується

схожість насіння, прискорюється ріст наземної частини рослин. УФ-С випромінювання при дозах 120-150 Дж/м<sup>2</sup> збільшує енергію проростання, та схожість насіння моркви. В польових умовах відзначається також збільшення врожайності насіння моркви.

Показано, що при ультрафіолетовому опроміненні клубнів картоплі дозами 120-240 Дж/м<sup>2</sup> в області С прискорено утворювалися і розвивалися первинні коріння, посилювався вегетативний ріст та збільшувалася врожайність.

Запропонована технологія бактерицидного знезараження сипучих харчових продуктів з розміром частинок до 50 мкм. При цьому використано технічне рішення, яке дозволяє здійснювати знезараження частинок в камері опромінювання під час їх вільного падіння під дією сили земного тяжіння.

Запропоновано спосіб бактерицидного знезараження вугілля активованого від дріжджових і плісневих грибів з використанням УФ-опромінення і озонування при їх комплексній дії.

Ключові слова: ультрафіолет, УФ-опромінення, доза опромінення, бактерицидне знезараження, мікробіологічне очищення, інактивація, енергія проростання, схожість, активоване вугілля, насіння сільгоспкультур.



## ВСТУП

Оптичне випромінювання є найбільш важливим фактором середовища проживання людини. Параметри цього явища грають істотну роль в життєдіяльності людини. Ще в 70-90-ті роки минулого століття в різних сферах діяльності людства, де хімічні методи виявилися не ефективними, тільки застосування УФ-випромінювання дало можливість вирішити ряд проблемних завдань у медицині, біології, матеріалознавстві і т. д.

У даний час УФ-технології розвиваються швидкими темпами у промисловості, медицині, комунальному господарстві, сільському господарстві і т. д. Цей розвиток став можливим завдяки промислому виробництву потужних джерел ультрафіолетового випромінювання, що дозволило їх використовувати для знезараження води, повітря, поверхонь і т.д.

У роботі проаналізовано використання УФ-джерел в різних технологічних процесах, методики вимірювання параметрів ламп і вибрані напрямки перспективних досліджень, зокрема розробка технологій опромінення сипучих матеріалів та насіння сільськогосподарських культур.

Для практичної реалізації запропонованих технічних рішень наведені характеристики джерел УФ-випромінювання, переваги та недоліки використання розрядних ламп в різних технологічних процесах, методики вимірювання потужності та контролю УФ-потoku бактерицидних ламп.

У роботі також представлені результати власних досліджень та розроблень, зокрема методика прогнозування корисного строку служби ультрафіолетових ламп за стабільністю променевого потоку, мікробіологічне знезараження сипучих продуктів та активованого вугілля, застосування УФ-опромінення в передпосівній обробці насіння.

Зроблені висновки та пропозиції щодо подальшого розвитку цих та інших напрямків досліджень з використанням УФ-випромінювання.

Дана робота «Ультрафіолетові опромінювальні установки

фотобіологічної дії: дослідження та розробка технологій і обладнання для опромінення сипучих харчових продуктів та насіння сільгоспкультур» є продовженням науково-дослідної роботи «Дослідження та розробка вдосконалених конструкцій ультрафіолетових установок фотохімічної і фотобіологічної дії», номер державної реєстрації 0112U007433, виконаної в період 2011 – 2015 рр.

## **РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ДЖЕРЕЛ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ**

Основними чинниками, що визначають ефективність джерел УФ-випромінювання, є: спектр випромінення, потужність лампи, ККД, робочий (корисний) і повний ресурс, спад потоку УФ-випромінювання в процесі служби лампи, компактність і вартість ПРА, безпеку і технологічність використання джерела, вартість [1-3].

### **1.1 Розрядні джерела УФ-випромінювання**

Серед різних типів джерел УФ-випромінювання ртутні розрядні лампи отримали найбільш широке застосування. Це пояснюється тим, що розряд в парах ртуті випромінює в усіх діапазонах УФ-спектру, ртуть має високу потужність пару, що дозволяє створити різні конструкції ламп з тиском пару від 1,3 Па до  $1,3 \cdot 10^6$  Па ( $10^{-3}$  мм рт. ст. до десятків атмосфер), ртуть хімічно мало активна і майже не взаємодіє з матеріалами колби та електродів, що забезпечує досить високу надійність і строк служби ламп. В залежності від тиску пару ртуті розрізняють лампи низького тиску від 1,3 Па до  $1,3 \cdot 10^3$  Па ( $10^{-3}$  мм рт. ст. до кількох мм рт. ст.), лампи високого тиску від  $1,3 \cdot 10^3$  Па до  $1,3 \cdot 10^6$  Па (від кількох мм рт. ст. до 10 атмосфер) і надвисокого тиску більше  $1,3 \cdot 10^6$  Па (більше 10 атмосфер) [1].

Змінюючи тиск пару ртуті в широких межах можна змінювати енергетичну яскравість дугового розряду і співвідношення випромінення в окремих спектральних діапазонах.

#### **1.1.1 Ртутні лампи низького тиску**

Структура енергетичних рівнів ртуті надзвичайно сприятлива для високоефективного генерування резонансного випромінення в УФ-діапазоні спектру (184,9 нм та 253,7 нм) [2].

Розрахункові значення променевих потоків резонансних ліній ртуті в залежності від тиску пару ртуті наведено на рисунку 1.1 [2].

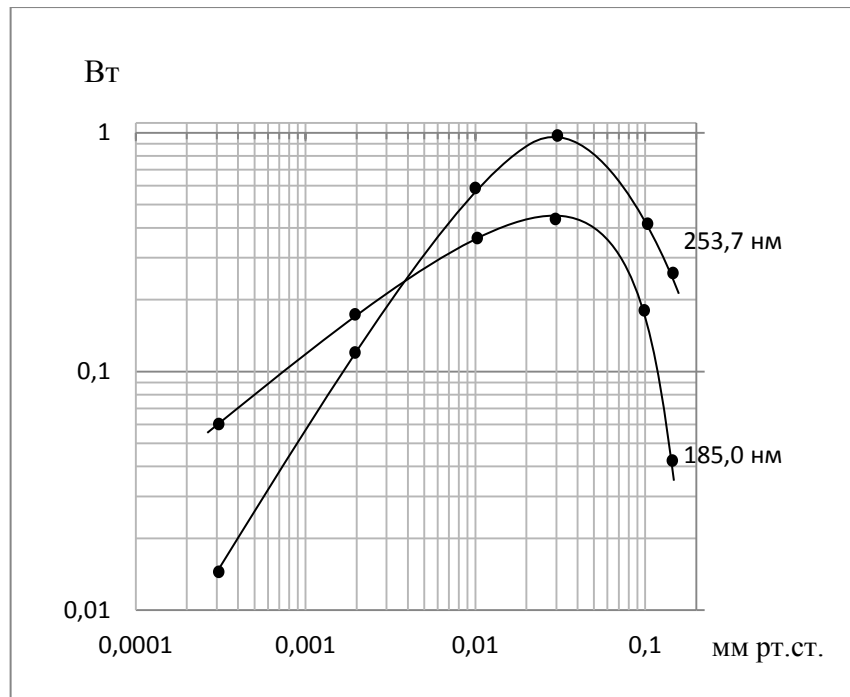


Рис. 1.1 Розрахункові значення променевих потоків резонансних ліній ртуті в залежності від тиску парів ртуті [2]

Зі зростанням тиску випромінювання обох ліній зростає, проходить через максимум і починає спадати. Слід зазначити, що зростання випромінювання ліній 253,7 нм більш інтенсивне в порівнянні з лінією 184,9 нм. При тиску пару ртуті нижче 0,7 Па ( $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) променевий потік лінії 184,9 нм більший ніж потік лінії 253,7 нм. Максимальна ефективність випромінюванням резонансних ліній в ртутному розряді низького тиску має місце приблизно при 4 Па ( $3 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.). Але чисто ртутний розряд в лампах практично не використовується. В чисто ртутному розряді низького тиску ймовірність дифузії метастабільних атомів до стінки трубки колби перевищує ймовірність їх зіткнення з електронами в результаті яких вони можуть перейти в другий енергетичний стан і випромінювати. Тому велика частина енергії розряду, що йде на збудження метастабільних атомів, переноситься ними до стінок трубки де перетворюється в тепло. Ситуація суттєво змінюється при додаванні в лампи інертного газу при тиску  $1,3 \cdot 10^2$  Па (1 мм рт. ст.). Це підвищує сумарний

тиск в лампі в сотні разів, тому в стільки ж разів зменшується довжина вільного пробігу метастабільних атомів і коефіцієнт дифузії. Внаслідок цього різко зростає ймовірність зіткнення метастабільних атомів з електронами і переходу їх на випромінюючий рівень.

Добавляння в лампу аргону підвищує вихід випроміненням лінії 253,7 нм приблизно в 3,5 рази, а випромінення лінії 184,9 нм – в 1,7 разів. Залежність сили випромінення резонансних ліній ртуті від тиску парів ртуті і від добавляння  $5,3 \cdot 10^2$  Па (4 мм рт. ст.) аргону наведено на рисунку 1.2.

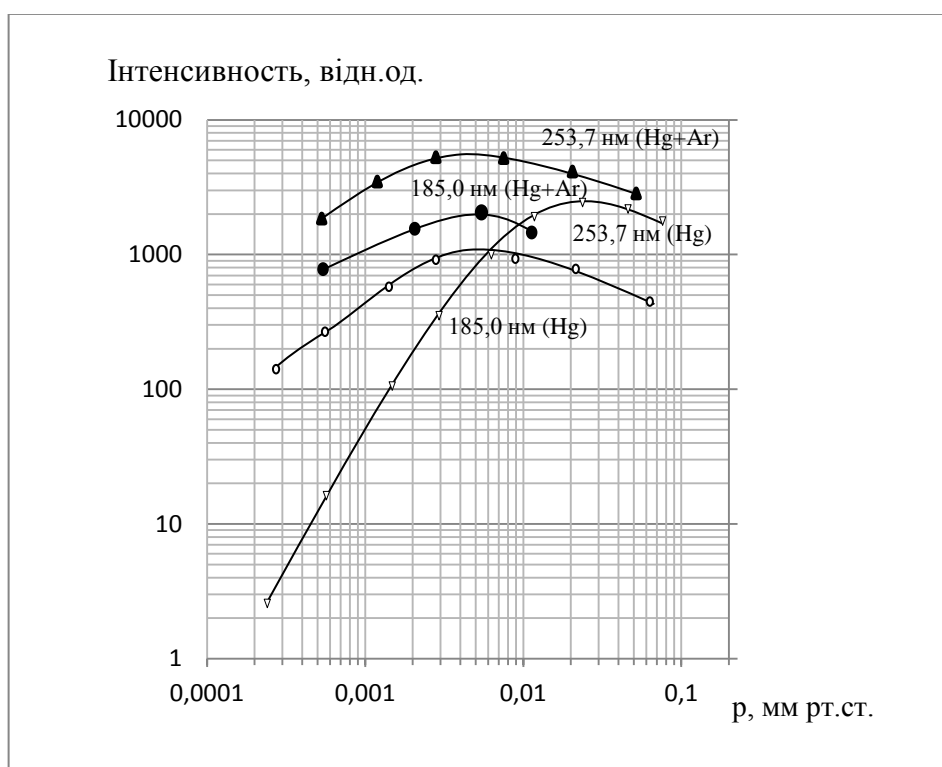


Рис. 1.2 Залежність сил випромінювання резонансних ліній ртуті 185 нм і 254 нм від тиску парів ртуті і від добавки до цих парів  $5,33 \cdot 10^2$  Па аргону

Залежність енергетичної яскравості резонансних ліній ртуті 184,9 і 253,7 нм від температури колби для різного складу та тиску наповнюючих інертних газів наведено на рисунку 1.3.

Зі зменшенням атомної ваги або тиску наповнюючих газів випромінення обох ліній зростає (при однаковому струмі і тиску пару ртуті), що пояснюється зростанням електронної температури в розряді. Зі зростанням струму

випромінення резонансних ліній зростає, спочатку майже лінійно, а потім наближається до насичення.

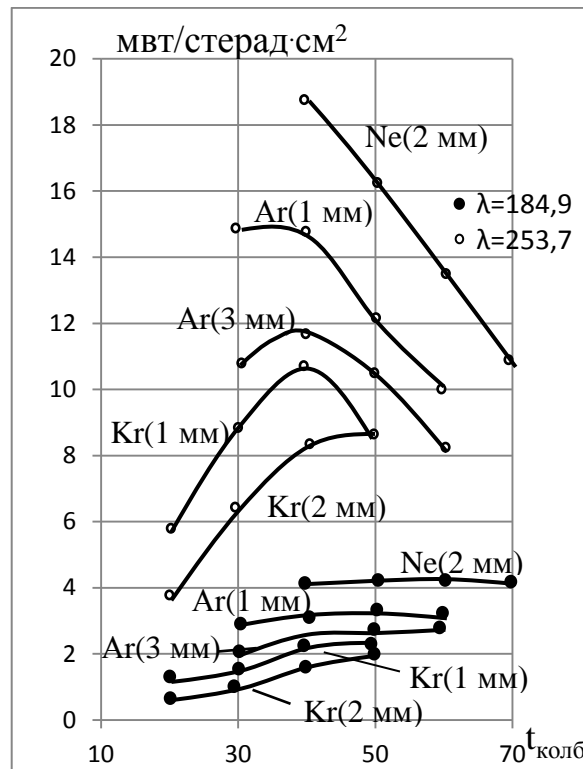


Рис. 1.3 Залежність променистості резонансних ліній ртуті 184,9 і 253,78 нм від температури колби для різного складу і тиску наповнюючого газу в лампі діаметром 38 мм

В таблицях 1.1 та 1.2 наведений розподіл енергії в складі стовпа розряду (ртуть + аргон 4 мм рт. ст.) в лампі з колбою діаметром 38 мм при кількох значеннях питомої потужності стовпа та в лампі з колбою діаметром 25 мм при різних значеннях струму [2].

Із розглянутих даних видно, що стовп ртутного розряду низького тиску є надзвичайно ефективним джерелом резонансного випромінення ртуті.

Для раціонального конструювання ламп необхідно знати залежність виходу резонансного випромінення від тиску парів ртуті, питомої потужності стовпа або струму, діаметра трубки та тиску наповнюючого газу.

Таблиця 1.1

Розподіл енергії в складі стовпа розряду в лампі з колбою діаметром  
38 мм при кількох значення питомої потужності стовпа

Питома потужність стовпа, Вт/см	Температура стілки колби, °С	Частка потужності стовпа, %, що перетворюється в випромінення ліній		
		253,7 нм	312,2 нм	365,1 нм
0,153	34	70,7	0,48	0,41
0,303	41	65,5	0,44	0,38
0,437	46	59,4	0,48	0,43
0,567	52	52,0	0,59	0,53
0,675	57	42,7	0,69	0,65

Таблиця 1.2

Розподіл енергії в складі стовпа розряду в лампі з колбою діаметром  
25 мм при різних значеннях струму

Струм, А	Температура стілки колби, °С	Частка потужності стовпа, %, що перетворюється в випромінення ліній		
		253,7 нм	312,2 нм	365,1 нм
0,25	48	62	0,53	0,45
0,50	57	55	0,68	0,62
1,00	69	40	0,89	0,82

Ртутні лампи низького тиску через невеликі градієнти потенціалу і малі густини струму мають високий вихід резонансного випромінення, але мають великі розміри при малих потужностях. Для підвищення потужності та зменшення розмірів ламп (при збереженні високих ККД виходу резонансного випромінення необхідно) підвищувати питому потужність (Вт/см), що можна досягти за рахунок збільшення сили струму або градієнту потенціалу (В/см). Більш ефективним є шлях збільшення градієнту потенціалу, так як це супроводжується зростанням електронної температури і позитивно впливає на

умови збудження атомів ртуті та виходу резонансного випромінення. При збільшенні сили струму збільшується концентрація електронів, що збільшує ступінчате збудження атомів, в результаті чого відносний вихід резонансного випромінення знижується.

Підвищення градієнту може бути досягнуто:

- зменшенням діаметру трубки;
- застосування не круглого перерізу трубки (наприклад еліпсоїдного);
- наповненням ламп інертним газом з малою атомною масою.

В усіх цих випадках зростають втрати електронів та іонів на стінках трубки і тому для підтримання рівноваги в плазмі необхідна підсилена генерація зарядів, що може досягатися підвищенням градієнту потенціалу  $E$  і електронної температури  $T_e$ .

В лампах з некруглим перерізом розрядної трубки число перевипромінювань фотонів від місця генерації до стінки колби менше, ніж для ламп з круглим перерізом. Це зменшує ймовірність гасіння збуджених атомів і додатковому підвищенню виходу резонансного випромінення, що актуально для створення потужних ртутних ламп низького тиску.

На основі розряду низького тиску створено великий асортимент УФ-ламп. У таблиці 1.3 представлені технічні параметри деяких ртутних бактерицидних ламп низького тиску [5].

Спектр атома ртуті, крім бактерицидної лінії 253,65 нм, містить іншу не менш інтенсивну лінію 184,95 нм, яка відноситься до області вакуумного УФ-випромінювання (ВУФ). У повітрі дане випромінювання поглинається киснем з утворенням озону. Сьогодні у світі зростає інтерес до використання ВУФ-випромінювання ртутного розряду. Такі УФ-джерела застосовуються при вирішенні задач очищення газів, фармакології, медицині та в інших сферах діяльності людства. Особливий інтерес представляє спільне використання випромінювання лінії 185 і 254 нм в задачах фотохімії.

Створення високоефективного джерела з довжиною хвилі 185 нм є складною науково-технічною задачею. Необхідно оптимізувати такі



параметри як тиск буферних газів та їх склад, тиск парів ртуті, струм лампи і його частоту. Крім того, принципово важливим є використання високоякісного (особливо чистого) кварцу, так як поглинання лінії 185 нм сильно залежить від домішок (одиниці або навіть десятки ppm).

Для створення високоефективних ртутних газорозрядних джерел ВУФ-випромінювання використовується тільки синтетичний кварц, який має високе пропускання випромінювання на довжині хвилі 185 нм. За рахунок цього вдається отримати ККД перетворення електричної енергії в ВУФ-випромінювання - 10%. Так, компанія Heraeus пропонує амальгамне джерело NIQ 125/84, що має електричну потужність 125 Вт і потужність випромінювання 10 Вт на лінії 185 нм. Також джерела ВУФ-випромінювання на основі ртутного розряду низького тиску виробляє компанія Philips, LightTech [4].

Таблиця 1.3

## Основні технічні параметри деяких ртутних ламп низького тиску

Тип лампи	P, Вт	I, А	Номінальний бактерицидний потік, Вт	Строк служби, год	Геометричні розміри, мм	Матеріал колби
озонні						
ДБ-15	15	0,33	2,5	5000	451x30	увіолеве скло
ДБ-30-1	30	0,36	6	5000	909x30	теж
ДБ-60	60	0,7	8	3000	909x30	теж
ДРБ-8-1	8	0,17	1,6	5000	302x16	теж
ДБ-15-Э*	15	0,31	2,5	3000	451x30	теж
ДБ-30-Э	30	0,36	6	5000	909x30	теж
ДБ-60-Э	60	0,7	8	3000	909x30	теж
ДРБ-8	8	0,17	3	5000	315x17	кварцове скло
ДРБ-40-1	40	0,45	10	3000	540x20	теж
ДРБ-60	60	0,75	15,8	3000	715x28	теж

ДБ-75-1	75	0,67	29	5000	1200x26	теж
безозонні						
ДРБ-15	15	0,35	4,5	3000	452x25	кварцове скло з покриттям
ДРБ-20	20	0,37	5,6	3000	414x25	теж
ДРБ-40	40	0,45	9	3000	634x25	теж
ДРБ-60	60	0,75	14	3000	715x28	теж
ДБ-18	18	0,35	5	8000	480x16,5	теж
ДБ-36-1	36	0,38	10,5	8000	860x16,5	теж
ДРБЭ-8**	8	0,17	2,5	2000	140x16	теж
УФРЛНТ***	1000	10,0	150	-	1200x10	увіолеве скло

\* - лампи з меншим вмістом ртуті;

\*\* - лампи U-подібної форми;

\*\*\* - дослідний зразок

Крім ламп з переважним випроміненням резонансних ліній створені лампи з більш довгохвильовим УФ-випроміненням за рахунок фотолюмінісцентного перетворення короткохвильового випромінення.

В таблиці 1.4 представлені параметри еритемних ламп і ламп типу ЛУФ [5].

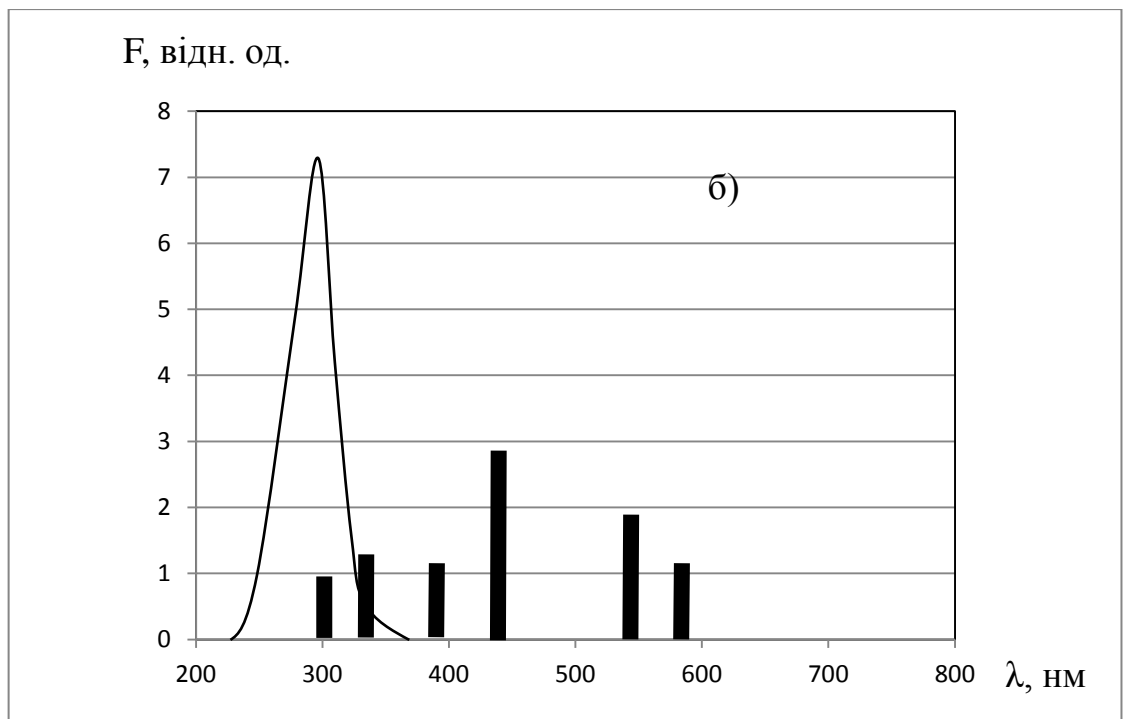
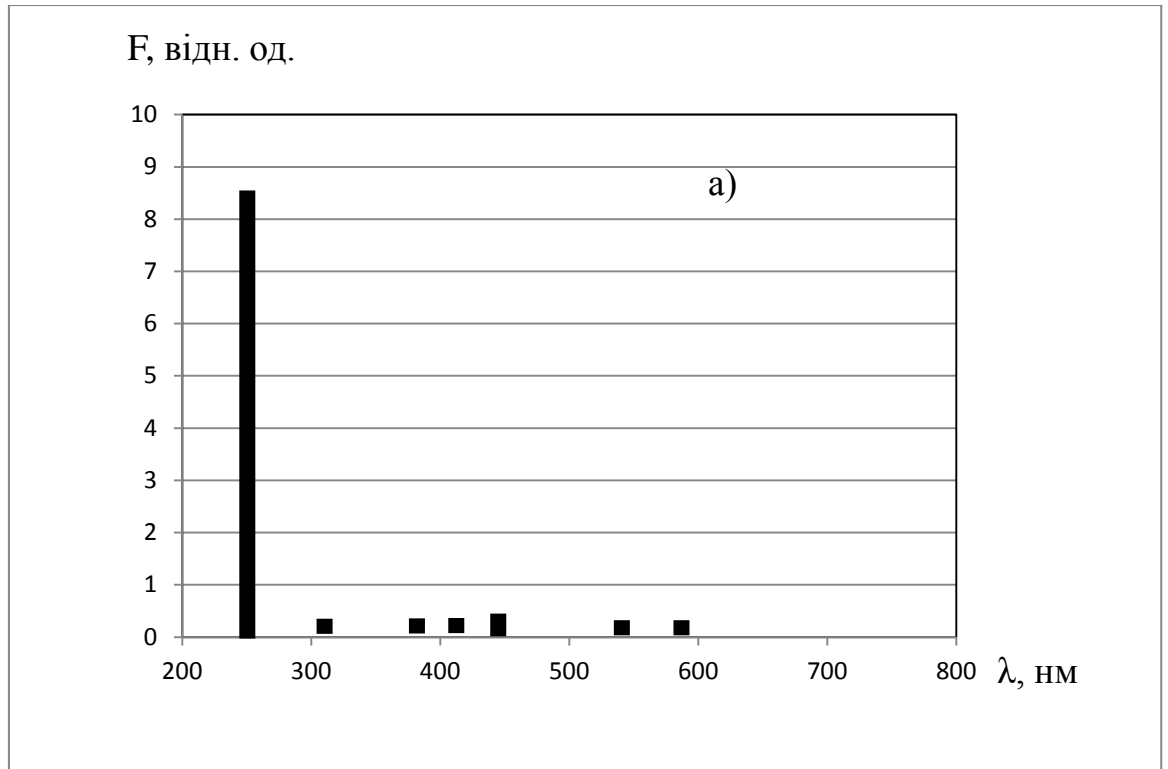
Таблиця 1.4

Параметри еритемних ламп і ламп типу ЛУФ

Тип лампи	P, Вт	U, В	Спектральний діапазон випромінювання, нм	Потік випромінювання в спектральному діапазоні, Вт	Строк служби, год.	Геометр. розміри, мм
ЛЭ 30	30	104	280-315	9,5*	5000	908x30
ЛЭР 40	40	103	280-315	14,0*	3000	1213x40
ЛУФ 80	80	102	300-400	9,2	4000	1213x40
ЛУФ 80-2	80	102	300-400	10,0	7500	1213x40

\* - еритемний потік, мер.

На рисунку 1.4 наведені спектри випромінення деяких типів УФ-ламп в яких використані фотолюмінофори [5].



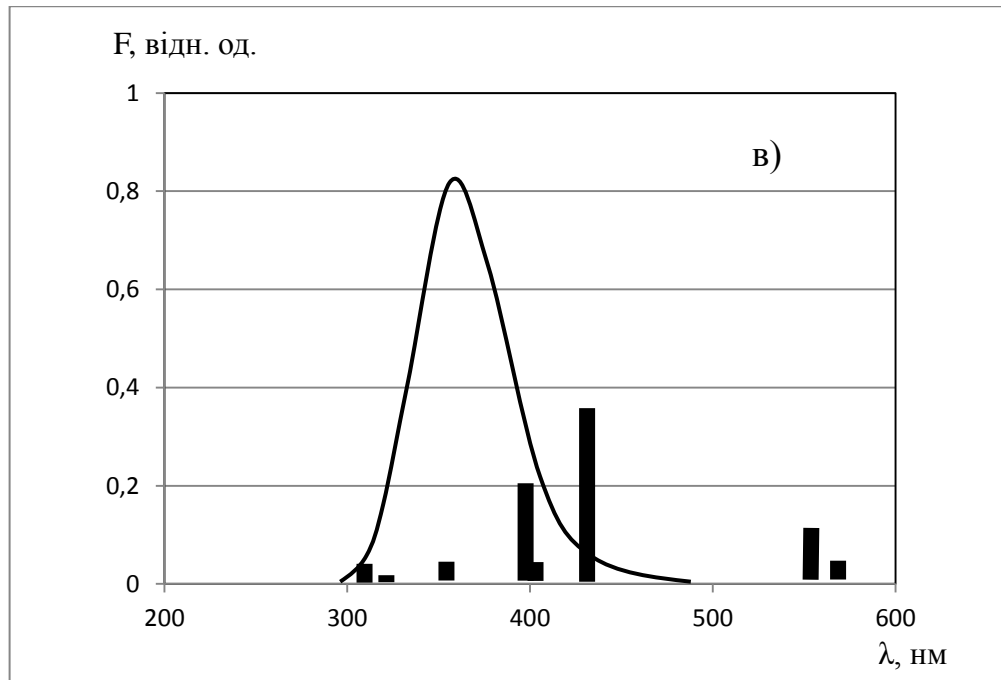


Рис. 1.4 Спектри випромінювання ламп низького тиску: а) – бактерицидної; б) – еритемної; в) – типу ЛУФ-40

Крім трубчастих ртутних розрядних ламп низького тиску, в яких для забезпечення необхідних для підтримання розряду концентрацій електронів використовують електроди з емітерним покриттям, розроблені безелектродні лампи. Особливості конструкції та функціонування цих ламп розглянуті в розділі 1.2.

Для роботи ртутних розрядних ламп низького тиску в умовах підвищених температур розроблені конструкції в яких ртуть замінена на амальгаму (сплави ртуті з металами). Ці лампи розглянуті в розділі 1.3.

При оптимальних параметрах конструкції та режимах функціонування (діаметр розрядної трубки-колби тиск пару ртуті та інертного газу, сила струму та інш.) можна отримати вихід випромінювання в резонансних лініях ртуті до 60 % всієї електричної потужності, що підводиться до лампи [1, 5].

### 1.1.2 Ртутні лампи високого тиску

До розрядних ламп високого тиску відносяться лампи, в яких робочий тиск пару (газу) складає  $3 \cdot 10^4 - 10^6$  Па ( $0,2 \cdot 10^2$  мм рт. ст. до  $7,5 \cdot 10^2$  мм рт. ст.) [1]. Як джерела УФ-випромінювання в цій категорії ламп найширшого застосування знайшли ртутні лампи високого тиску.

Зі збільшенням тиску пару ртуті і густини струму росте число різних зіткнень між електронами і атомами ртуті. При цьому відбувається обмін енергії між ними в результаті чого температура електронів падає, а температура пару (газу) зростає. Струм в стовпі переноситься в основному електронами, так як вони мають значно більшу рухомість, ніж іони. При тиску  $\sim 10^{-5}$  Па ( $7,5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.) і вище температура електронів і пару стають практично однаковими і досягають 4000-5000 К. В термічній плазмі при високому тиску пару переважає випромінювання нерезонансних спектральних ліній (ліній, що виникають при переходах електронів в атомах із одного збудженого стану в інший – з випромінюванням меншої енергії, ніж при переході в основний не збуджений стан).

Збільшення тиску пару ртуті і діаметра розрядної трубки призводять до збільшення поглинання резонансного випромінювання. Зона самого поглинання розширюється так, що при тиску в кілька десятків атмосфер в області резонансних ліній з'являється провал випромінювання, ширина якого зростає зі зростанням тиску пару. Зі зростанням тиску і величини струму відбувається розширення і нерезонансних ліній, причому частина ліній розширюється симетричного в обидві сторони, в той час як друга частина розширюється асиметрично в довгохвильову область спектру. Більшість ліній самопоглинаються. При тиску вищому за кілька атмосфер з'являється помітний неперервний фон. Його інтенсивність зростає з ростом тиску пару ртуті і струму.

Тиск пару ртуті при наявності в колбі рідкої фази ртуті визначається температурою поверхні рідкої фази. Залежність тиску від температури рідкої фази ртуті (яка визначається температурою холодної зони трубки лампи)

наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Залежність тиску від температури рідкої фази ртуті

Температура, $^{\circ}\text{C}$	265	340	380	490	550	730	850
Тиск, мм рт. ст.	$10^2$	$5 \cdot 10^2$	$10^3$	$5 \cdot 10^3$	$10^4$	$5 \cdot 10^4$	$10^5$

Питома потужність сумарного випромінювання стовпа трубчастих ртутних розрядних ламп високого тиску є приблизною лінійною функцією питомої потужності стовпа.

Значення питомих сил випромінювання найбільш інтенсивних УФ-ліній ртутного розряду високого тиску в залежності від тиску парів ртуті, для трьох діаметрів трубки (10, 16 і 24 мм) і кількох питомих потужностей  $P_{lcm}$  наведені на рисунках 1.5, 1.6 та 1.7 [2].

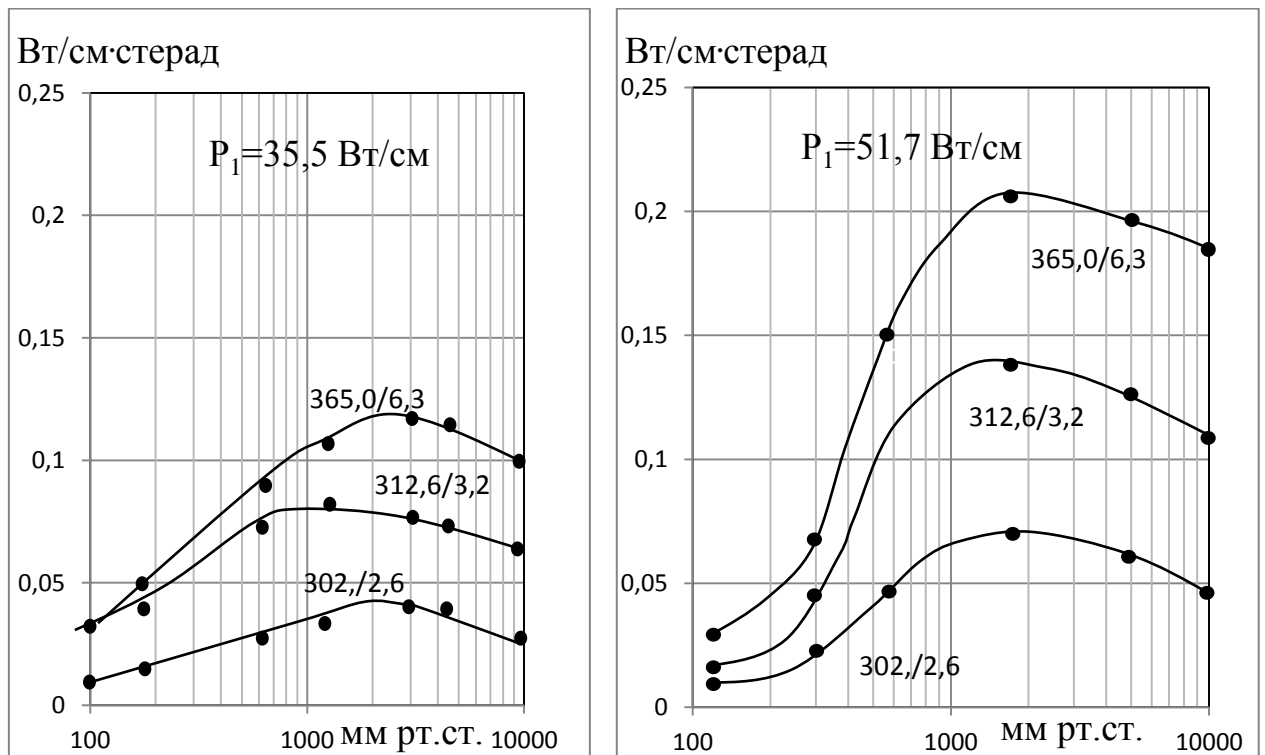


Рис. 1.5 Значення питомих сил випромінювання найбільш інтенсивних УФ-ліній ртутного розряду високого тиску в залежності від тиску парів ртуті для діаметра трубки 10 мм

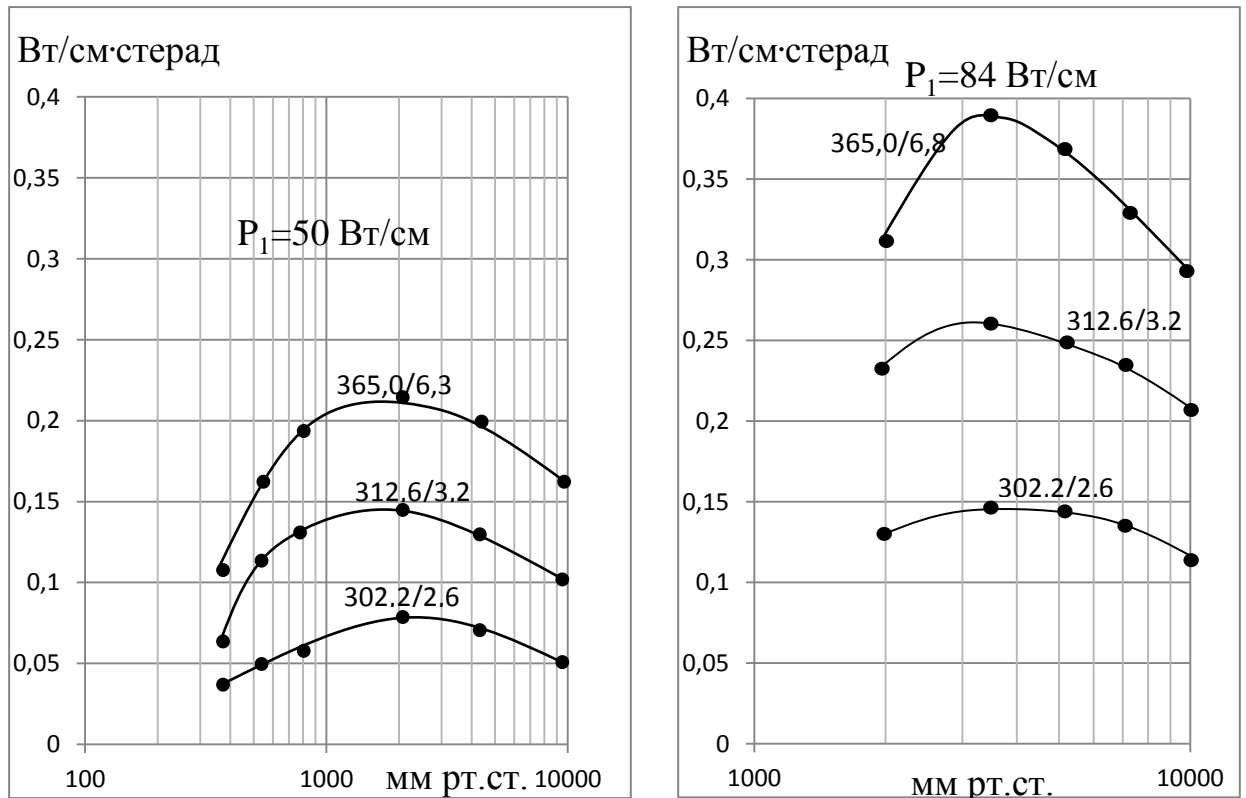


Рис. 1.6 Значення питомих сил випромінювання найбільш інтенсивних УФ-ліній ртутного розряду високого тиску в залежності від тиску парів ртуті для діаметра трубки 16 мм

Лінії, що мають високі потенціали збудження, зокрема: 248,2 нм, 265,2 нм, 269,9 нм, 275,3 нм, 280,4 нм, 289,4 нм, 296,7 нм, 302/303,6 нм, 312,6/313,2 нм, 334,1 нм, 365,0/366,3 нм зростають зі зростанням тиску, проходять через максимум і падають. Для більшості ліній максимум знаходиться в інтервалі тиску парів ртуті  $(2,7 \div 4) \cdot 10^3 \text{ Па}$   $((2 \div 3) \cdot 10^3 \text{ мм рт. ст.})$ . Положення максимуму залежить від питомої потужності і діаметра. ККД випромінювання окремих ліній з підвищенням питомої потужності  $P_{\text{лсм}}$  зростає, наближаючись до певної межі, різної для різних ліній і ділянок спектру.

Згідно з [2] для створення УФ-ламп з високою енергетичною яскравістю доцільно скористатись такими рекомендаціями.

При створенні ламп високої ефективності, що використовуються для опромінення, необхідно забезпечити: потрібний спектральний склад

випромінювання, отримання високої ефективності випромінювання при будь-яких потужностях ламп, отримання ламп, що мають високий строк служби, достатньо дешевих.

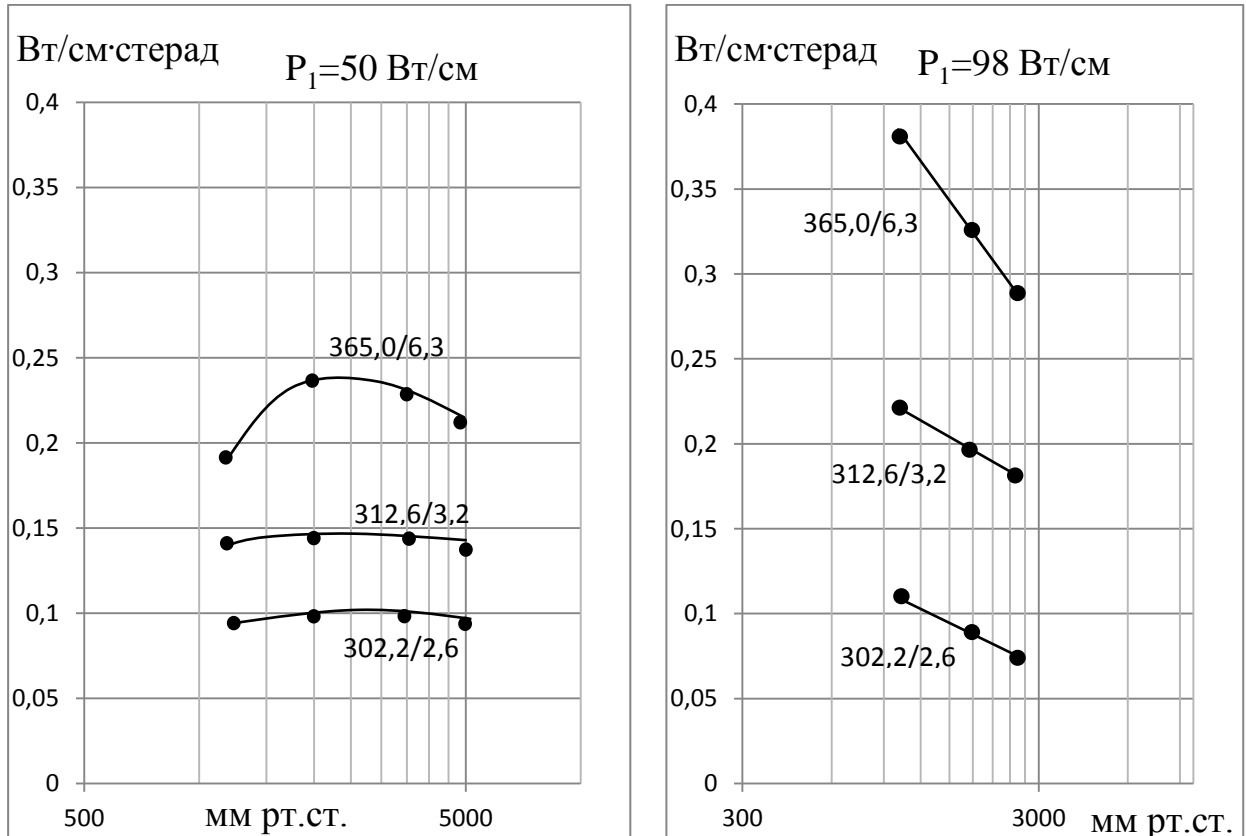


Рис. 1.7 Значення питомих сил випромінювання найбільш інтенсивних УФ-ліній ртутного розряду високого тиску в залежності від тиску парів ртуті для діаметра трубки 24 мм

Для отримання високого ККД необхідно використовувати випромінювання стовпа, оскільки випромінювання приелектродних частин значно менш ефективно. З метою зменшення приелектродних втрат повинен бути використаний дуговий розряд і активовані електроди, що дає можливість максимально знизити біяелектродні втрати напруги і довести їх до 10-15 В. Завдяки малій величині біяелектродних втрат вдається створювати лампи, розраховані на роботу від мережі нормальної напруги, в яких до 90% потужності виділяється в області стовпа.



Для отримання нерезонансного випромінювання з високим ККД сприятливі високі тиски і великі потужності струму. В цих умовах баланс енергії для одиниці довжини стовпа може бути представлений у вигляді:

$$F_{1cm} = c_F (P_{1cm} - L_{1cm}), \quad (1.1)$$

де  $c_F$  - коефіцієнт, менший одиниці і слабо залежний від умов розряду;  $F_{1cm}$  - питома потужність сумарного випромінювання;  $P_{1cm}$  - питома електрична потужність стовпа;  $L_{1cm}$  - питомі теплові втрати стовпа.

При зміні умов розряду в даному газі  $L_{1cm}$  змінюється значно повільніше, ніж  $P_{1cm}$  і  $F_{1cm}$ , і тому для багатьох розрахунків можуть бути прийняті постійними.

Для інженерних розрахунків доцільно користуватися експериментальними даними, що представлені або графічно, або у формі емпіричних відношень, наприклад, наступного виду [2]:

$$F_{1cm}(\lambda_k) = c_\lambda(p, d) \cdot (P_{1cm} - L_{1cm}) \quad (1.2)$$

де  $c_\lambda$  - коефіцієнти, що являються в основному функціями тиску пару або газу і діаметра трубки і різні для різних спектральних ліній і ділянок спектру;  $L_{1cm}$  - коефіцієнт, близький по своїй величині до питомих теплових втрат.

Із ростом тиску газу або пару при постійних значень діаметру і питомої потужності відбувається, з однієї сторони збільшення концентрації нормальних атомів, а з іншої сторони, падіння температури розряду. Одночасно з цим змінюється величини абсорбції і радіусу розрядного каналу. В результаті спільної дії цих факторів питомий променевий потік спектральної лінії із зростанням тиску звичайно збільшується, проходить через максимум і падає. Положення максимуму і форма кривої залежить від потенціалу збудження та інших факторів.

При постійних значеннях  $p$  і  $d$  питома потужність випромінювання окремих спектральних ліній або ділянок спектра приблизно лінійно залежить від  $P_{1cm}$ . Характер залежності випромінювання від діаметру необхідно визначати з експерименту, оскільки визначити його теоретично досить складно.

Аналогічні співвідношення повинні спостерігатися і для питомої сили випромінювання, оскільки потік пропорційний силі випромінювання  $F_{1cm}(\lambda_k) = \gamma_{\lambda} I_{1cm}$  і коефіцієнт пропорційності є повільно і малозмінюючою функцією умов розряду. Значення  $\gamma$  лежить в межах від  $\pi^2$  до  $4\pi$ . Більш точні значення слід знаходити з експерименту.

Коефіцієнт корисної дії випромінювання стовпа термічних дуг. З балансу енергії енергетичний ККД сумарного випромінювання стовпа дорівнює:

$$\eta = \frac{F_{1cm}}{P_{1cm}} = \left( 1 - \frac{L_{1cm}}{P_{1cm}} \right) \quad (1.3)$$

Оскільки  $L_{1cm}$  змінюється значно повільніше ніж  $P_{1cm}$  і  $F_{1cm}$ , енергетичний ККД сумарного випромінювання зростає із ростом  $P_{1cm}$ , прагнучи до визначеної межі. Аналогічний характер залежності від  $P_{1cm}$  при  $p$  і  $d = const$  повинен спостерігатися і для ККД випромінювання окремих спектральних ліній і ділянок спектру і в тому числі, для світлової віддачі. Цей висновок підтверджується на досліді.

Залежність ККД окремих спектральних ліній від тиску і діаметру при постійній питомі потужності визначається в основному, як це видно із (1.2) характером зміни  $c_{\lambda}$  від цих параметрів:

$$\eta(\lambda) = c_{\lambda} \left( 1 - \frac{L_{1cm}}{P_{1cm}} \right) \quad (1.4)$$

Із наведених міркувань випливає, що для підвищення ККД випромінювання стовпа розрядів високого тиску необхідно прагнути:

- 1) до зменшення питомих теплових втрат;
- 2) до збільшення питомої потужності;
- 1) до вибору тиску газу і діаметру трубки, що відповідають максимальному значенню  $c_\lambda$ .

Підвищення питомої потужності може бути досягнуто шляхом збільшення градієнту потенціалу і сили струму.

Зменшення питомих теплових втрат може бути досягнуто шляхом вибору робочої речовини з мінімальною теплопровідністю. Оскільки теплопровідність зменшується із ростом атомної ваги газу або пару, то більш вигідно використання газів або парів з найбільшою атомною вагою, наприклад ртуті, ксенону та інших.

При створенні ламп з високою променистістю необхідно забезпечити:

- 1) високу променистість при будь-яких потужностях лампи;
- 2) потрібний спектральний склад випромінювання;
- 3) необхідні розміри випромінюючого стовпа.

Розглянемо випромінюючий об'єм з осьовою симетрією, що представлений на рисунку 1.8.

Променевий потік будь-якої спектральної лінії, що випромінюється певним об'ємом стовпа, пов'язаний із силою випромінювання і променистістю цієї лінії наступним виразом [2]:

$$F_\lambda = \gamma_\lambda J_{\lambda\perp} = \gamma_\lambda \beta_\lambda (l 2R_{0\lambda}) B_{\lambda\perp} \quad (1.5)$$

де  $J_{\lambda\perp}$  – сила випромінювання в напрямку перпендикулярному осі симетрії;  
 $B_{\lambda\perp}$  – променистість в напрямку осі і, що проходить через початок відліку;  $l$  – довжина випромінюючого тіла;  $2R_{0\lambda}$  – ефективний діаметр випромінюючого

тіла в плоскості  $z=0$ ;  $\gamma_\lambda$  - коефіцієнт пропорційності, що характеризує відносне просторове розподілення сили випромінювання для даної спектральної лінії.

$$B_{\lambda\perp} = \frac{c_\lambda \left(1 - \frac{L_{cm}}{P_{cm}}\right)}{\gamma_\lambda \beta_\lambda} \cdot \frac{P_{cm}}{2R_{0\lambda} l} \quad (1.6)$$

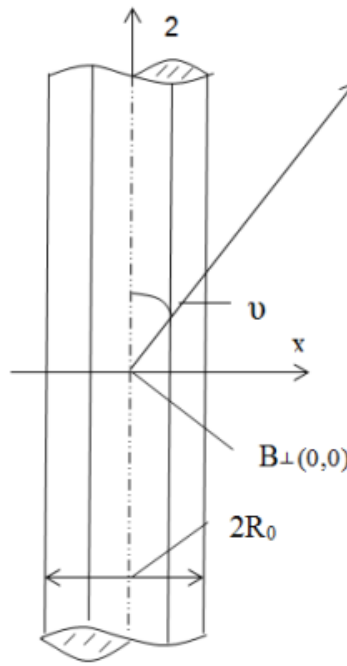


Рис. 1.8 Схематичний вигляд випромінюючого об'єму

Із формули 1.6 слідує, що променистість прямо пропорційна потужності розряду, значенню коефіцієнта  $c_\lambda$  і обернено пропорційна площі поперечного перерізу тіла, що світиться  $2R_{0\lambda} l$ .

Для розрядів в циліндричних трубках у яких  $l \gg R_{0\lambda}$ , можна перейти до питомих характеристик стовпа ( $P_{1cm} \approx P_{cm} / l$ )

$$B_{\lambda\perp} = A_{\lambda cm} \cdot \frac{P_{1cm}}{R_{0\lambda}} \quad (1.7)$$

де

$$A_{\lambda cm} = c_{\lambda 1} \left( 1 - \frac{L_{1cm}}{P_{1cm}} \right) : 2\gamma_{\lambda} \beta_{\lambda} \quad (1.8)$$

При зміні умов розряду  $P_{1cm}$  і  $r_{TP}$  відбувається повільна зміна коефіцієнтів  $c_{\lambda}$ ,  $\gamma_{\lambda}$  і  $\beta_{\lambda}$ . Тому якщо  $L_{1cm}/P_{1cm} \ll 1$ , то коефіцієнт  $A_{\lambda cm}$  в окремих межах зміни умов розряду може бути прийнятий постійним.

Практична постійність коефіцієнта  $A_{\lambda cm}$  є виразом того факту, що при зміні умов розряду зберігається світлотехнічна подібність розрядів під якими ми розуміємо постійність коефіцієнтів  $\gamma_{\lambda}$  та  $\beta_{\lambda}$ .

Значення  $A_{\lambda cm}$  доцільніше всього визначати експериментально для відповідних умов і типів розрядів.

Із формули 1.6 і 1.7 слідує, що у стаціонарних термічних дугах для підвищення променистості необхідно збільшувати питому потужність, вибирати умови розряду, що відповідають найбільшому  $c_{\lambda}$  і зменшувати діаметр розрядного каналу. Потрібно підкреслити, що ці умови взаємопов'язані. Підвищення питомої потужності може бути досягнуто: 1) шляхом підвищення тиску газу і пару і зв'язаного з цим збільшення градієнту потенціалу і 2) шляхом збільшення сили струму.

Для зменшення діаметру розрядного каналу в розрядах високої інтенсивності наявні наступні можливості:

- 1) зменшення діаметру розрядної трубки;
- 2) підвищення тиску;
- 3) вибір наповнювального газу;
- 4) використання явища біяелектродного стягування розряду.

Якщо температура (розміри торців) електродів невеликі, то розряд стягується біля електродів. Це стягування розповсюджується і на дотичні частини розряду, обмежуючи їх розширення. Тому поблизу електродів при наявності цього ефекту виникають області підвищеної яскравості.

Реалізація цих шляхів привела до створення двох типів ламп високої яскравості стаціонарної дії: 1) капілярних ламп з водяним охолодженням і 2) ламп з короткою дугою в колбах кульової або близької до неї форми.

Значно більш високі миттєві яскравості, ніж в стаціонарних розрядах, вдається отримати в імпульсних розрядах за рахунок суттєво більших високих миттєвих значень питомої потужності і великих градієнтів температури до країв розряду. При достатньо великих значеннях миттєвих потужностей, що виділяються в розряді, яскравість досягає граничних значень і перестає рости при подальшому збільшенні потужності. Це пов'язано з тим, що розряд стає не прозорим для власного випромінювання в тонких шарах і набуває властивостей поверхневого випромінювача. Тому подальше збільшення густини енергії, що в водиться в розряд, не призводить до зростання променистості, а супроводжується такими процесами, в результаті яких енергія, що подається могла би бути відведена. Такими процесами є: збільшення випромінюючої поверхні за рахунок розширення розрядного каналу або підвищення температури плазми до таких значень, при яких з'являються і починають грати роль інші процеси відводу енергії для яких ще не наступила рівновага. При високих степенях іонізації, це може бути випромінювання безперервного спектру, випромінювання збуджених іонів, іонна теплопровідність та інше.

Найбільш типовими ртутними розрядними УФ-лампами високого тиску є лампи типу ДРТ (дугова, ртутна, трубчата). Вони представляють собою трубку із кварцового скла на кінцях якої впаяні вольфрамові активовані електроди. Загальний вигляд лампи наведено на рисунку 1.9, розміри та електричні характеристики – в таблиці 1.6, УФ-опроміненості, що створюють окремі лінії ламп на відстані 1 м – в таблиці 1.7.



Рис. 1.9 Загальний вигляд лампи дугової ртутної, типу ДРТ

Таблиця 1.6

Розміри та електричні характеристики дугових ртутних ламп типу ДРТ

Величина	ДРТ 240	ДРТ 400
Потужність лампи, Вт	240	400
Напруга на лампі, В	120	120
Сила струму, А		
робоча	2,3	3,7
пускова	4,2	6
Довжина частини, що світиться, мм	105	100
Повна довжина лампи, мм	227	257
Діаметр лампи, мм	18	20
тиск, атм.	1	1,2
Положення горіння	Горизонтальне	
Час повторного розгорання, хв.	15	15
Час повторного запалювання, хв	10	10

Таблиця 1.7

УФ-опроміненість окремих ліній дугових ртутних ламп типу ДРТ

на відстані 1 м

Довжина хвилі, нм	Опроміненість, мкВт/см <sup>2</sup>		Довжина хвилі, нм	Опроміненість, мкВт/см <sup>2</sup>	
	ДРТ 240	ДРТ 400		ДРТ 240	ДРТ 400
248,2	7,2	15,4	302,2/26	44,1	22,5
253,7	18	37,8	312,6/313,2	98,1	47,7
265,2	16,2	34,2	334,1	9,5	4,6
269,9	2,9	6,0	365,0/366,3	144	70,2
275,3/275,6	2,2	4,9	404,7/407,8	52,2	25,2
280,0	7,1	15,1	435,8	91	43,2

289,4	3,5	7,3	546,1	105	49,5
296,7	10	20,7	577,0/579,0	102	49,5

### 1.1.3 Металогалогенні лампи високого тиску

Одним з найбільш ефективних УФ-джерел світла є металогалогенні лампи, що мають високий ККД перетворення електричної енергії в УФ-випромінювання і можливість в широких межах регулювати спектр випромінювання.

Принцип роботи МГЛ базується на створенні необхідного тиску парів випромінюючих добавок за рахунок введення їх у вигляді легко випаровуваних сполук – галоїдних солей. За достатньої температури стінок колби в об'ємі розрядної трубки створюється певний тиск парів введених солей, котрі, дифундуючи в область розряду під дією високої температури, розкладаються на галоген і галогенні радикали, а в підсумку – метали. Атоми металу збуджуються і випромінюють. Під час зворотної дифузії окремі компоненти в області пониженої температури рекомбінують до вихідних сполук. Найбільш повно фізичні основи роботи МГЛ викладено в [2, 5].

Існує багато металів, котрі у вигляді галогенидів можуть бути використані як випромінюючі добавки спеціальних ламп. В [2, 5] приведено дані співставлення щодо випромінювання різних елементів і приблизні рекомендації по підбору наповнення для розробки МГЛ.

Спектри випромінювання ламп ДРІ та ДРТІ із різними випромінюючими добавками представлені на рисунку 1.10.



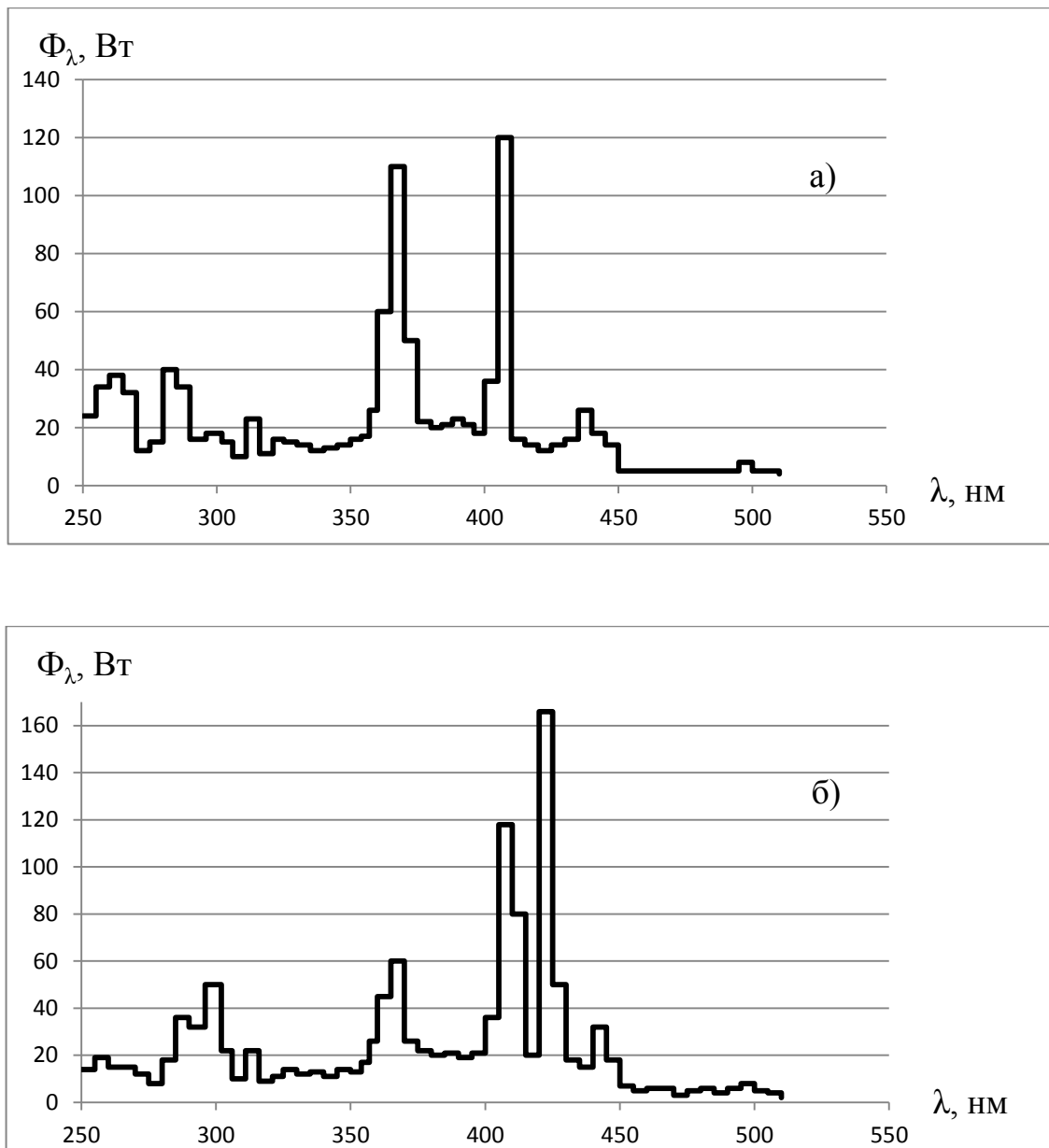


Рис. 1.10 Спектри випромінювання ламп ДРІ та ДРТІ із різними випромінюючими добавками: а) - з йодидами свинцю; б) - з йодидами галію, свинцю

В останній час з'явився новий напрямок, котрий передбачає заміну високотоксичної ртуті, що використовується в ролі буферного наповнення МГЛ, на екологічно чистий ксенон, а також МГЛ з полікоровими розрядними трубками [2].

Зважаючи на те, що МГЛ з точки зору фізико-хімічних процесів є найбільш складними лампами, доцільно окремо провести більш детальний

аналіз шляхів підвищення виходу випромінення в УФ-області спектру та інших експлуатаційних параметрів.

Серед першочергових завдань дослідження та подальшого вдосконалення МГЛ слід виділити: підвищення виходу УФ-випромінення в різних діапазонах, оптимізацію теплового режиму пальників, в тому числі з врахуванням впливу конвекції в пальниках та зовнішніх колбах ламп; дослідження впливу конвекційних процесів на стабільність дуги та променевого потоку; дослідження та оптимізацію комплексу “лампа-ПРА”, підвищення стабільності електричних параметрів та променевого потоку в процесі експлуатації; дослідження конструкцій МГЛ з використанням полікорових розрядних трубок та з безртутним буфером.

Енергетичний ККД металогалогенної лампи  $\eta_{\lambda}(\lambda)$  для окремих спектральних ліній або ділянок спектру-дорівнює:

$$\eta_{\lambda}(\lambda) \cong c_{\lambda} \left( 1 - \frac{U_{ак}}{U_{\lambda}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{P_{1T}}{P_{1CT}} \right) \quad (1.9)$$

де  $P_{1CT}$  - питома електрична потужність розрядного стовпа;  $P_{1T}$  - питомі теплові втрати розрядного стовпа;  $U_{ак}$  - розрахункове значення величини падіння анодно-катодного потенціалу;  $U_{\lambda}$  - напруга на лампі;  $c_{\lambda}$  - коефіцієнти, різні для різних спектральних ліній або ділянок спектру, що визначаються тиском домішок і буферного газу чи пару, діаметром трубки.

Енергетичний ККД лампи визначається через ККД кожної спектральної лінії наступним чином:

$$\eta_{\lambda} = 683 \sum V(\lambda) \cdot \eta(\lambda) = 683 \left( 1 - \frac{U_{ак}}{U_{\lambda}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{P_{1T}}{P_{1CT}} \right) \cdot \sum F(\lambda) c_{\lambda} \quad (1.10)$$

де:  $\eta_{\lambda}$  – променистий потік лампи;  $F(\lambda)$  - функція ефективної дії

УФ-випромінення для конкретного процесу.

З виразу (1.10) можна зробити висновок, що для підвищення ККД розрядної лампи високого тиску необхідно: зменшувати питомі теплові втрати розрядного стовпа  $P_{1T}$ ; збільшувати питому потужність стовпа  $P_{1CT}$ ; збільшувати  $U_n$ ; намагатися досягти максимального значення  $\sum F(\lambda)c_\lambda$ , що можна зробити шляхом вдалого вибору складу композиції домішок та тиску буферного газу.

Зупинимось на запропонованих тезах. Щодо першої, пояснимо, що зменшення  $P_{1T}$  можливо досягти шляхом вибору буферного пару або газу з мінімальною теплопровідністю. Так як у всіх поширених конструкціях металогалогенних ламп як буферний газ використовуються ртутні пари під тиском декілька атмосфер, то можливості зменшити питомі теплові втрати за рахунок теплопровідності буферного газу практично не існує. Можна показати, що при малій густині випромінюючих домішок (до 10% від густини ртуті), без огляду на їх значну теплопровідність, порівняно з парами ртуті, вони мають незначний вплив на теплопровідність суміші.

Вважається, що питомі теплові втрати стовпа практично не залежать від умов розряду. Для ртутного розряду це дійсно так, оскільки теплові втрати пропорційні різниці температур каналу розряду й стінки, а інтенсивність випромінення та електропровідність плазми експоненціально залежать від температури плазми.

Однак, в металогалогенних лампах в значних межах змінюється діаметр розрядного каналу і, відповідно, товщина зони теплопровідності. Тому слід більш уважно розглянути питомі теплові втрати стовпа таких ламп з урахуванням діаметра розрядного каналу.

Виконаємо розрахунки з наступними спрощуючими положеннями:

- в зоні теплопровідності відсутнє поглинання випроміненням;
- температура в каналі розряду постійна й дорівнює  $T_0$ .
- коефіцієнт, теплопровідності  $\chi$  не залежить від температури.

Тоді тепловий потік через циліндричну поверхню з радіусом  $r$

одиничної висоти дорівнює:

$$P_{1T} = -\bar{\chi} \frac{dT}{dr} 2\pi r \quad (1.11)$$

Інтеграл від цього виразу має наступний вигляд:

$$P_{1T} = \frac{2\pi\bar{\chi}(T_0 - T_{CT})}{\ln\left(\frac{r_{TP}}{R_{E\Phi}}\right)} \quad (1.12)$$

де  $T_{CT}$  - температура внутрішньої стінки пальника;  $R_{E\Phi}$  – ефективний радіус розрядного каналу;  $r_{TP}$  – внутрішній радіус трубки;  $\bar{\chi}$  – середній коефіцієнт теплопровідності ртуті в температурному діапазоні  $T_0$ - $T_{CT}$ .

При зміні ефективного радіуса каналу в межах  $R_{E\Phi}/r_{TP} < 0,4-0,5$  значення величини  $P_{1T}$ , змінюються помірно і лише при  $R_{E\Phi}/r_{TP} > 0,5-0,6$  починається його різке зростання. Таким чином, з метою підвищення енергетичного ККД в металогалогенних лампах потрібно забезпечувати умови розряду з радіусом розрядного каналу, що задовольняють вимозі  $R_{E\Phi}/r_{TP} < 0,5$ .

Відносно збільшення питомої потужності стовпа можна констатувати, що, з незначним зростанням питомих теплових втрат, воно підвищує ККД лампи. Є два шляхи збільшення  $P_{1CT}$ : за рахунок збільшення градієнту потенціалу та за рахунок сили струму. Порівнюючи ці шляхи, можна дійти висновку, що збільшення градієнта потенціалу має ряд переваг, перед збільшенням сили струму [2]:

- збільшення градієнта потенціалу можливо досягти шляхом підвищення тиску парів буферного газу (ртуті), яке в свою чергу підвищує вихід випромінювання за рахунок збільшення ширини резонансних ліній випромінюючих домішок;
- збільшення градієнта потенціалу за умови, що підвищення напруги в мережі не обмежується, дозволяє при тих же або й менших

геометричних розмірах збільшити напругу на лампі  $U_{\text{л}}$  що зменшує частку електродних втрат  $U_{\text{ак}}/U_{\text{л}}$ ;

- збільшення сили струму розряду, крім збільшення частки електродних втрат, призводить також до збільшення кількості вільних зарядів у дузі, а отже підвищує ступінь іонізації випромінюючих домішок, що може знизити вихід випромінювання з розряду металогалогенних ламп.

В залежності від характеру задачі можливо змінювати питому потужність, геометрію пальника, кількість ртуті й випромінюючих домішок, силу струму в лампі. Інші параметри (температура, пальника, тиск парів домішки і ртуті, радіус розрядного каналу та ін.) є залежними, тому, зі зміною  $P_{\text{ист}}$  одночасно змінюється декілька факторів від котрих в різній мірі залежить Енергетичний ККД.

## 1.2 Безелектродні джерела УФ-випромінювання

В даний час створені ефективні та потужні джерела бактерицидного випромінювання на основі індукційного розряду трансформаторного типу [2]. Їх ККД і потужності УФ-випромінювання подібні електродним лампам низького тиску [3, 5]. Проте через необхідність формування розряду в замкнутому контурі, їх геометрія стає менш зручною і дорогою для застосування при знезараженні води. Тим не менше, дані джерела випромінювання мають перспективи застосування для знезараження повітря і поверхонь.

Багато розробників безелектродних ламп стверджують [2], що строк служби таких виробів істотно вище, ніж у ламп низького тиску за рахунок відсутності електродних вузлів. Проте це не зовсім так для ламп з розрядом в парах ртуті та інертного газу при низькому тиску: дійсно, відсутність електродного вузла може продовжити фізичний строк служби лампи, але ця обставина ніяк не впливає на корисний строк служби лампи, що визначається

взаємодією плазми розряду з поверхнею колби і осадженням атомів ртуті на стінках. Потемніння кварцового скла через деградацію стінки та наявності на ній ртуті повинно рівною мірою проявлятися як у електродних, так і в безелектродних джерелах випромінювання.

В безелектродній лампі можна знижувати тиск наповнюючого газу, збільшуючи ефективність розряду. До переваг безелектродної лампи можна також віднести відсутність катодного і анодного падіння напруги. Лімітуючим чинником фізичного ресурсу горіння системи лампа - ПРА в цьому випадку виступає не тільки потемніння стінки колби, а й вихід з ладу електронних компонентів пускорегулюючих пристроїв. При живленні безелектродних ламп частотами вище 400 МГц можуть відбуватися процеси руйнування внутрішньої стінки кварцу за рахунок взаємодії високочастотної плазми з кварцом при високих температурах. Це призводить до погіршення запалювання лампи і спаду інтенсивності УФ-випромінювання [6].

В даний час зусилля дослідників і розробників індукційних ламп спрямовані в першу чергу на проектування безелектродних ламп світлового діапазону випромінювання для освітлення. Одним з небагатьох прикладів серійних джерел випромінювання подібного типу може служити люмінесцентна лампа трансформаторного типу Osram Endura (рис. 1.11) [7].

Розроблена також лампа трансформаторного типу з розрядом низького тиску для генерації бактерицидного випромінювання на довжині хвилі 254 нм. Її застосування для знезараження води поки що обмежене через складність створення додаткового захисного кварцового чохла і складності конструювання обладнання. Крім того, забезпечення відповідного контакту в магнітопроводах індукційних котушок є складним завданням при наявності вібрацій. Подібні лампи також виробляють компанії Philips і General Electric.

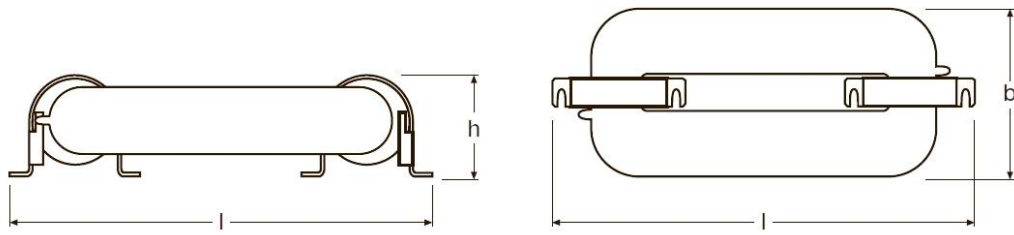


Рис. 1.11 Лампа Endura 100 W/840, торгової марки «Osram»

Фірмою Toshiba розроблені безелектродні індукційні лампи УФ-випромінювання потужністю до 500 Вт [8]. ККД таких ламп може досягати 30%. Проте широкого застосування в даний час вони не знайшли через складність пускорегулюючого апарату і великих габаритів випромінювача.

Стримуючим чинником широкого впровадження ламп з високочастотним розрядом є обмежений вибір дозволених промислових і побутових частот, складність приладів живлення ламп в діапазоні частот вище 10 МГц та їх висока вартість, наявність сильних електромагнітних полів поблизу джерел живлення і випромінювання, великі втрати потужності на пристроях узгодження. При живленні ламп струмом в діапазоні частот 100-500 кГц необхідно застосовувати лампи із замкнутим магнітним витком, що призводить до технічних складнощів у застосуванні таких ламп для знезараження води.

### 1.3 Амальгамні джерела УФ-випромінювання

В даний час світові лідери у виробництві амальгамних ламп пропонують джерела УФ-випромінювання потужністю від 50 до 1000 Вт з ККД від 25 до 42%, при розрядних токах 1-7 А, спадом УФ-випромінювання до кінця строку служби 5-30% і корисним строком служби до 8000-18000 год [8].

Настільки широке різноманіття амальгамних джерел пов'язано з тим, що такі лампи набувають все більшого поширення в різних технологічних процесах, головними з яких залишаються знезараження води, повітря і поверхні. Можна сказати, що за останні 19 років (з 2000 р.) ринок обладнання, як втім і ринок самих амальгамних бактерицидних ламп, переживає бурхливе зростання.

До основних лідерів у виробництві таких специфічних джерел світла, як амальгамна лампа можна віднести наступні компанії: Philips Lighting (Нідерланди), LSI/Lighttech (США/Угорщина), First Light (США), Heraeus Nobelight (Німеччина), Ushio (Японія) та НВО «ЛІТ» (Росія).

У багатьох випадках амальгамна лампа низького тиску є не тільки оптимальним рішенням для завдань знезараження води і повітря, а часто і єдино можливим, тому що за сукупністю ключових показників: ефективність (бактерицидна, а також і енергетичний ККД), екологічність (вміст ртуті та інших шкідливих матеріалів), строк служби лампи і ЕПРА, спад УФ-випромінювання, вартість лампи і ЕПРА, одинична потужність - це джерело, яке не має наближеної альтернативи.

Амальгамна лампа є складним електровакуумним пристроєм. Крім високого ККД вона повинна володіти високим ресурсом і працювати 1-2 роки без помітного зниження потужності УФ-випромінювання при зміні температури зовнішнього середовища 0-70 °С. Розміри ламп і їх потужність залежать від конкретних сфер використання. Для запобігання утворенню озону в повітрі колба ламп виготовлена з кварцу, легованого окисом титану (приблизно 200 ppm), що поглинає озonoутворююче випромінювання з довжиною хвилі 185 нм. Такі лампи називають безозоновими, і спектр УФ-випромінювання складається з однієї лінії 254 нм. Однією з основних цілей виробників є збільшення потужності бактерицидних амальгамних ламп при збереженні ККД генерації УФ-випромінювання 254 нм близько 35-40% і корисним строком служби не менше 12000-16000 годин для використання в установках знезараження води і повітря.



Застосування амальгами (розчин ртуті в іншому металі) дозволяє підтримувати оптимальний тиск парів ртуті в розряді низького тиску при набагато більших токах і, відповідно, потужностях, ніж в традиційних лампах низького тиску із застосуванням рідкої ртуті (тиск насичених парів над рідкою ртуттю істотно вище, ніж над амальгамою при однаковій температурі).

Амальгама представляє собою твердий або рідкий розчин ртуті в одному або декількох металах. Перші досліді використання амальгами в люмінесцентних лампах проводилися ще в кінці 50-х рр. XX ст. Проте амальгамні лампи низького тиску стали використовуватися тільки в кінці 90-х рр. XX ст. в якості потужних вискоєфективних джерел бактерицидного випромінювання [9].

При виробництві амальгамної лампи в колбу закладається твердий сплав ртуті з іншими металами. Тиск насичених парів ртуті над цим сплавом істотно менше, ніж над чистою ртуттю, тому при кімнатній температурі концентрація ртуті в колбі мала. При запаленні амальгамної лампи відбувається розігрів стінок її колби до температур 80-130°C. Саме при цих температурах тиск насичених парів ртуті над амальгамою виходить на оптимальний рівень 0,7-1,5 Па для забезпечення максимальної ефективності генерації УФ-випромінювання ртутною дугою низького тиску. Як і в ртутній лампі, основна енергія випромінювання припадає на резонансні лінії ртуті 185 і 254 нм. Чим менше молярна частка ртуті в розчині, тим менше тиск насиченої пари ртуті буде над поверхнею розчину. Компоненти амальгами в джерелі випромінювання повинні надавати мінімальний вплив на розряд і не взаємодіяти з елементами конструкції і стінкою лампи. Досягається це використанням металів, парціальний тиск яких над розчинами набагато нижче, ніж тиск ртуті, а хімічна активність при впливі плазми мінімальна. При застосуванні амальгами оптимальне тиск парів ртуті досягається при більш високих температурах колби лампи, а, отже, і при більш високих потужностях розряду. Таким способом можна підняти погонну електричну потужність розряду до 2-3 Вт/см і зберегти високий ККД перетворення електричної

потужності в УФ-випромінювання, властивий ртутним лампам низького тиску. Застосування амальгам дозволяє підняти як робочу температуру колби, так і збільшити діапазон зовнішніх температур, при яких зберігається висока світловіддача лампи.

Основною характеристикою амальгами є залежність тиску насичених парів від температури. Застосовуючи різні склади амальгам, можна отримати області стабілізації тиску парів ртуті в різних температурних діапазонах. Ширина діапазону температур зі стабільним тиском парів ртуті також визначається складом амальгами. На рисунку 1.12 показано, що застосовуючи чотирьохкомпонентну амальгаму можна забезпечити оптимальний тиск парів ртуті 0,7-1,5 Па в надзвичайно широкому діапазоні температур 60-150 °С. Таким чином, для необхідної потужності лампи можна підібрати свій оптимальний склад амальгами.

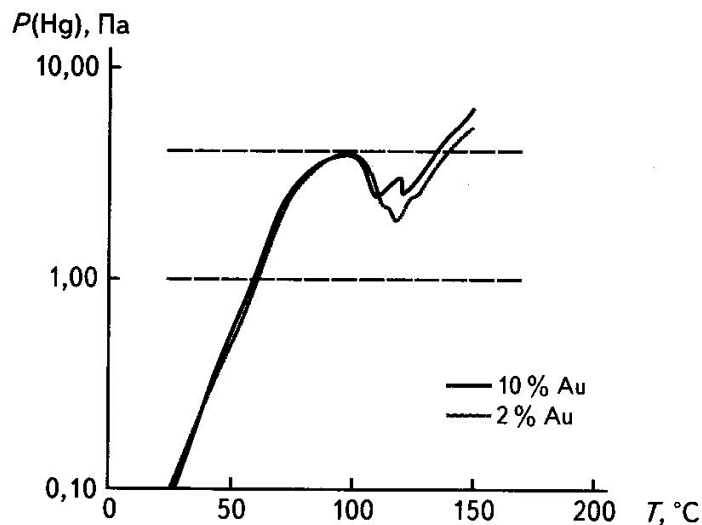


Рис.1.12 Залежність тиску парів ртуті від температури над  $\text{Bi}_{0.55}\text{Pb}_{0.43}\text{Au}_{0.02}\text{Hg}_{0.01}$  і  $\text{Bi}_{0.55}\text{Pb}_{0.4}\text{Au}_{0.1}\text{Hg}_{0.01}$  амальгамами

У найпростішому варіанті амальгамної лампи, сплав що містить ртуть розміщується безпосередньо на внутрішній стінці розрядної трубки. При цьому температура стінки збігається з робочою температурою амальгами. Для деяких складів амальгам характеристики по тиску настільки стабільні, що

лампа може ефективно працювати в широких межах температур стінки колби, наприклад від 80 до 130 °C (рис. 1.13). Оскільки амальгамні лампи працюють при високій температурі стінок, то потужність УФ-випромінювання не так чутлива до зміни температури навколишнього середовища, як у ртутних ламп низького тиску.

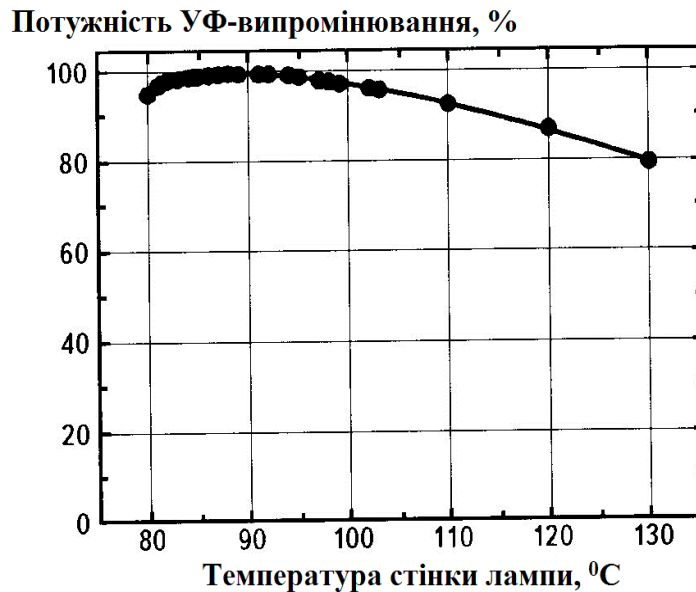


Рис. 1.13 Приклад залежності потужності УФ-випромінювання амальгамної лампи низького тиску від температури стінки лампи [8]

Наприклад, для потужних ламп, або ламп, що працюють в екстремально гарячих умовах, використовують амальгаму, яка містить тугоплавкі метали (в порівнянні з індієм) - олово, срібло, мідь, золото, магній, нікель і свинець в таких пропорціях (в мольних частках): ртуть - 0,001-0,005, свинець - 0,24-0,48, олово - 0,45-0,73. Використання багатокомпонентних амальгам дозволяє отримати джерела випромінювання з декількома максимумами потужності випромінювання по температурі. Внаслідок складнощів розрахунку термодинамічних функцій багатокомпонентних амальгам вибір амальгами здійснюють, як правило, експериментально.

Застосування амальгами замість металеві ртуті в джерелах випромінювання істотно покращує екологічні показники лампового

виробництва і експлуатаційні властивості обладнання, в якому ці лампи застосовуються. Основна маса ртуті знаходиться в зв'язаному стані (амальгамі), а у вільному стані - тільки 0,03 мкг на лампу, тому тиск парів ртуті при температурі до 50 °С нижче ГДК. Ці лампи істотно безпечніше, в порівнянні із люмінесцентними лампами. Амальгаму можна використовувати і в безелектродній лампі.

Останнім часом і з урахуванням значного прогресу в технології використання амальгамних ламп, особливо потужних джерел, важливе значення приймає питання енергозбереження. Сучасні потужні амальгамні лампи, наприклад лампи НПО «ЛІТ» ОВ500, ОВ700НО, ОВ900НО спільно з відповідним електронним баластом, керованим контролером, дозволяють здійснювати регулювання УФ-потужності в широких межах (а також і електричної потужності) системи в діапазоні від 100 до 30 %, при цьому використання багатокомпонентних амальгам і спеціальних алгоритмів роботи електродів лампи дозволяють не тільки здійснювати регулювання, а й істотно збільшувати при цьому ККД всієї системи. Таким чином, УФ-обладнання на базі таких потужних амальгамних ламп зі спеціальними властивостями забезпечує економічний режим роботи при зменшеній (наприклад, в нічний час) витраті води.

Найважливішою характеристикою є число включень-виключень лампи, яке залежить від конструкції електродного вузла лампи, алгоритму роботи ЕПРА і їх взаємного узгодження. Правильний вибір алгоритму запуску ЕПРА в стартовий період, оптимальна конструкція електрода, здатна працювати з заданим ЕПРА струмом лампи, дозволяють досягати строку служби лампи до 25 тис. годин, при цьому число вмикань-виключень може досягати 50-100 тис. циклів, що цілком порівняно вже і з безелектродними варіантами амальгамних ламп. Однак можна відзначити, що в більшості випадків цілком достатньою є величина 2-5 тис. включень протягом всього строку служби лампи. Деякі компанії, про які згадувалося вище, крім можливості виробництва амальгамних джерел УФ-випромінювання можуть пропонувати і готові

рішення, тобто комплект «лампа + оригінальний ЕПРА» вже з оптимально підібраними параметрами.

Взагалі варто було б відзначити, що сучасні тенденції розвитку амальгамних ламп визначаються відповідними завданнями, так, наприклад, задача зниження вартості УФ-установок і зменшення експлуатаційних витрат при заміні ламп призводить до задачі створення амальгамної лампи з високою одиничною потужністю, що дозволяє знизити кількість лампоузлів, зробити установку більш компактною і дешевою при тій же витраті і якості, наприклад води. З іншого боку, підвищення потужності лампи призводить до зниження її ККД, а також і до ще більшого зниження сумарного ККД системи «лампа + ЕПРА» за рахунок зниження ККД ЕПРА.

Можна навести й кілька інших прикладів, коли вимоги до джерела УФ-випромінювання визначає сфера застосування, наприклад, для знезараження технологічної води теплообмінників або теплоцентралей потрібні лампи з можливістю ефективної роботи в гарячій воді (40-70 °C), для знезараження повітря в системах вентиляції і кондиціонування виключно важлива надійність і здатність роботи при великих швидкостях обдування, для задач знезараження баластних вод кораблів і суден - компактність і висока питома потужність.

Тому завдання вибору джерела є комплексною задачею з урахуванням первинних капіталовкладень в устаткування, витрат на заміну ламп і ЕПРА та експлуатаційних витрат.

#### **1.4 Ксенонові джерела УФ-випромінювання**

У розрядних лампах високої інтенсивності використовується випромінювання дугового розряду у важких інертних газах (аргоні, криптоні або ксеноні). На відміну від ламп з парами металів середня щільність газу в таких лампах залишається постійною незалежно від теплового режиму колби.

Внаслідок цього відсутній період розігрівання, а електричні та світлові характеристики в широких межах не залежить від температури колби.

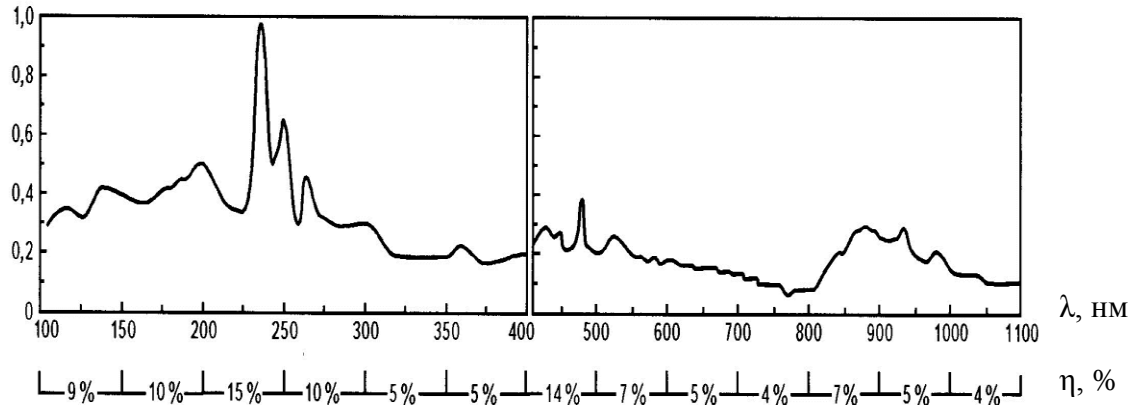
Ксенонові лампи по режиму роботи поділяють на дві великі групи [10]. У першу групу входять лампи, призначені для роботи в режимі непереривного горіння в мережах змінного струму, в другу - в імпульсному режимі в спеціальних схемах включення.

Спектр трубчастих ксенонових ламп, що працюють в режимі безперервного горіння, охоплює широку область ультрафіолетового випромінювання [11]. Завдяки великій одиничній потужності від 2000 до 20000 Вт і більше в цих лампах потік ультрафіолетового випромінювання досягає значних величин. Наприклад, в спектральному діапазоні 220-400 нм потік випромінювання знаходиться в межах від 20 до 200 Вт . Через обмеження робочої температури оболонки ламп ККД генерації УФ-випромінювання безперервного розряду виходить достатньо низький.

Для підвищення спектрального ККД в діапазоні короткохвильового УФ-випромінювання застосовується імпульсне живлення ксенонових ламп. Принцип роботи таких УФ-випромінювачів полягає в наступному. Потужний імпульс струму з енергією 0,1-50 кДж подається на розрядний проміжок. Тривалість імпульсу зазвичай становить від однієї до тисяч мікросекунд. За час дії імпульсу на газ в порівняно малому розрядному проміжку утворюється плазма з високим ступенем іонізації, яку протягом всього часу розряду можна розглядати як рівноважну. Отже, її випромінювання підкоряється закону чорного тіла і визначається температурою плазми. Спектр випромінювання ксенонової плазми при імпульсному розряді залежить від потужності імпульсів, що подаються.

На рисунку 1.14 наведено спектр випромінювання ксенонової лампи при імпульсному збудженні з великими піковими потужностями. Спектральний розподіл практично є безперервним в широкому діапазоні довжин хвиль, а частка випромінювання в бактерицидному діапазоні довжин хвиль від 200 до 300 нм становить 25% усього випромінювання в діапазоні 100-1100 нм.

$I_\lambda$ , відн. од.



Довжина хвилі ( $\lambda$ ) і доля енергії ( $\eta$ )

Рис. 1.14 Розподіл енергії випромінювання по спектру імпульсної ксенонової лампи

Бактерицидний потік імпульсної лампи  $\Phi_o$  визначається інтегралом від інтенсивності випромінювання  $I(\lambda)$  і відносної спектральної бактерицидної ефективності  $S(\lambda)$  по всьому спектру протягом імпульсу з частотою  $F$  (рис. 1.15):

$$\Phi_o = F \iint I(\lambda, t) S(\lambda) d\lambda dt \quad (1.13)$$

ККД бактерицидного випромінювання (з врахуванням кривої бактерицидної ефективності) імпульсних ксенонових ламп складає 8-10%.

Слід зазначити, що широкий спектр випромінювання імпульсних ксенонових ламп для знезараження є скоріше недоліком, ніж перевагою, так як його короткохвильова частина може призводити до небажаного утворення озону, до побічних хімічних реакцій і напрацюванню шкідливих для людини з'єднань.

Оскільки резонансне випромінювання ксенону з довжинами хвиль 147 і 172 нм вимірювати в дослідженнях досить складно, то часто використовують

люмінофори, що переводять це випромінювання в ближній УФ або видимий діапазон довжин хвиль. При лінійному виході видимого випромінювання в залежності від потужності УФ-випромінювання можна вимірювати видиме випромінювання і по ньому робити висновки про ефективність генерації УФ-випромінювання.

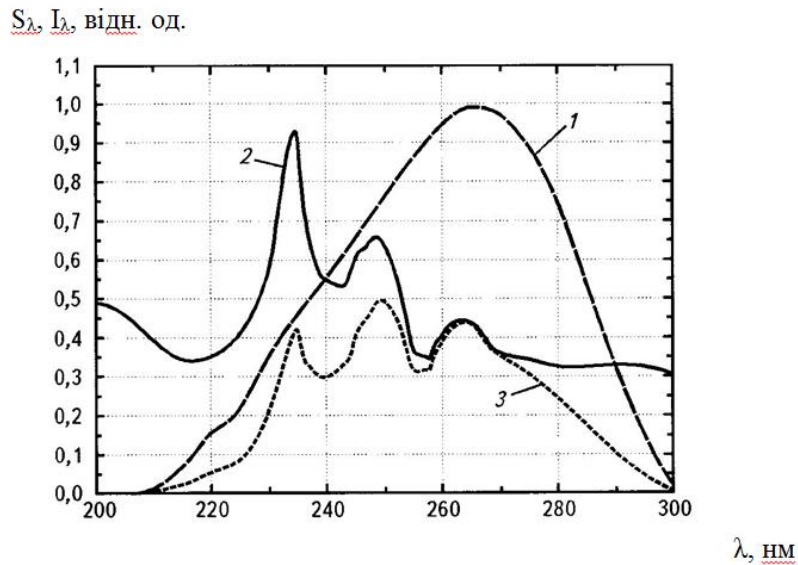


Рис. 1.15 Бактерицидна ефективність імпульсної ксенонової лампи

На рисунках 1.16 і 1.17 показані залежності випромінювання і ККД ксенонових ламп від частоти і тривалості імпульсу від потужності [8], що прикладається при двох різних тисках ксенону і різних тривалості імпульсів.

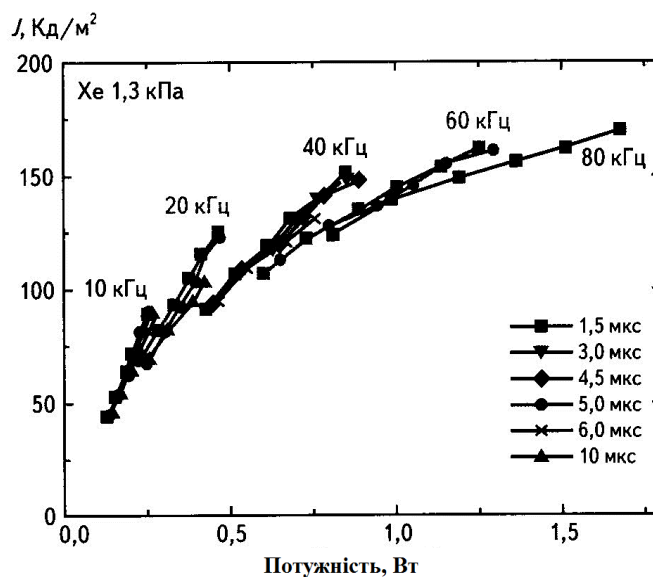


Рис. 1.16 Залежність світлового виходу  $J$  від вхідної потужності при  $P_{\text{Xe}} = 1,3 \text{ кПа}$



При однаковій потужності, що підводиться до розряду інтенсивність випромінювання і ККД вище при більшому тиску ксенону. Це пояснюється збільшенням кількості атомів ксенону з порушеними і метастабільними станами  $^1S_5$ , які в збудженому стані поглинають випромінювання резонансних рівнів з довжиною хвилі 147 нм і 172 нм.

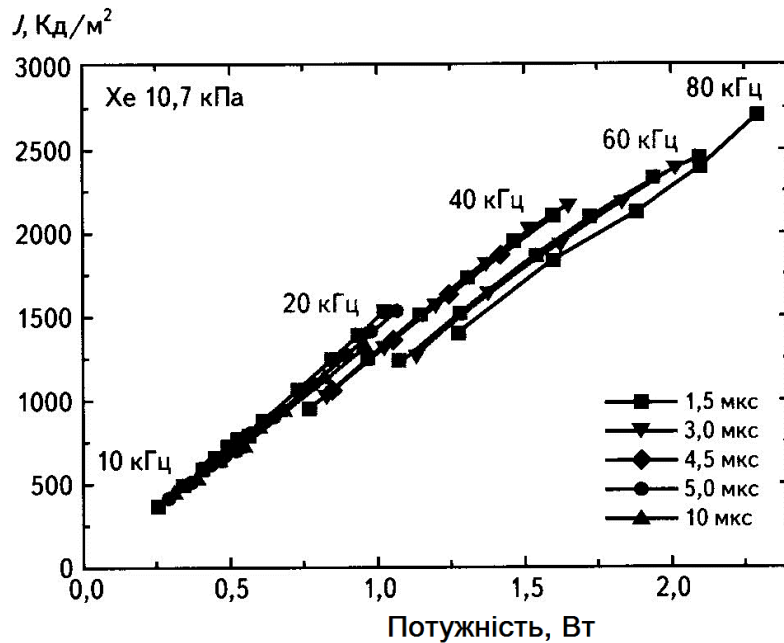


Рис. 1.17 Залежність світлового виходу  $J$  від вхідної потужності при  $P_{\text{He}} = 10,7$  кПа

При збільшенні частоти проходження імпульсів інтенсивність випромінювання і ККД зменшуються. При збільшенні частоти інтервал між імпульсами зменшується. При цьому зростає кількість залишкових іонів і електронів, а значить, знижується електронна температура протягом наступного імпульсу, що призводить до зменшення кількості збуджених рівнів з високими енергіями і зменшенню інтенсивності їх випромінювання. При зменшенні тривалості імпульсу при однаковій частоті інтенсивність випромінювання і ККД розряду зростають. ККД перетворення електричної потужності в діапазоні довжин хвиль 200-250 нм становить 4% при тиску ксенону 0,7 атм. і при збільшенні тиску може зрости в кілька разів до 8-15%.

Таким чином, імпульсні джерела бактерицидного УФ-випромінювання характеризуються високою (до декількох мегават) миттєвої потужністю і бактерицидною ефективністю не більше 10%.

Варто зазначити, що застосування імпульсних розрядів у благородних газах для отримання бактерицидного випромінювання обмежене не тільки недостатніми величинами виходу бактерицидного випромінювання та ефективністю, але і складнощами практичного використання джерел випромінювання з таким розрядом, а також невисоким строком служби випромінювачів і імпульсних джерел. Наприклад, строк служби ксенонових імпульсних ламп визначається числом спалахів і зменшенням потужності УФ-випромінювання в процесі роботи ламп. Зазвичай число спалахів для серійних ламп становить  $10^7$ - $10^8$ , а максимальна частота проходження спалахів від десятків герц до сотень кілогерц. При такому числі спалахів отримуємо, що час безперервної роботи лампи буде менше 1000 годин. Число спалахів залежить також і від складу застосовуваних газів. Зменшення потужності УФ-випромінювання до кінця строку служби може становити 20-50% від початкової величини. В УФ-області спектру, чим менше довжина хвилі, тим більше падіння з часом випромінювання лампи на цій довжині хвилі.

Для запалювання імпульсних ксенонових ламп потрібно пробійна напруга більше 1 кВ, що ускладнює їх застосування для знезараження води. Застосування потужної високовольтної техніки значно збільшує габарити і складність пускорегулювальної апаратури (ПРА) для імпульсних ламп. На практиці також слід враховувати втрати в джерелі живлення, що приводить до зменшення ККД системи ксенонова лампа - ПРА, іноді втрати в ПРА становлять 50% від середньої потужності лампи.

Конструктивно трубчасті ксенонові лампи представляють собою кварцову трубку, по обох кінцях якої впаяні електроди, що закінчуються жорсткими або гнучкими виводами. Спосіб охолодження ламп повітряний або водяний. Є лампи, у яких кварцова трубка зігнута в спіраль.

В імпульсному режимі роботи в каналі розряду об'ємна щільність потужності досягає значень приблизно в  $10^6$  разів більших, ніж в безперервному режимі. Це призводить до розігріву плазми до десятків тисяч градусів, що, відповідно до закону Віна, зміщує максимум випромінювання в короткохвильову ультрафіолетову область спектру. Чим вище щільність струму, тим вище частка УФ-випромінювання. Високий вміст ультрафіолетового випромінювання в спектрі імпульсних ксенонових ламп визначає доцільність їх застосування в тих випадках, коли потрібне отримання потужних короткочасних потоків УФ-випромінювання.

Строк служби імпульсних ксенонових ламп визначається числом спалахів, які може забезпечити лампа. Чим вище енергія імпульсу, тим менше число включень лампи, яке варіюється від  $10^3$  до  $10^8$  імпульсів. Середня потужність лампи регулюється зміною частоти проходження імпульсів. Для обладнання американської фірми LightStream Technologies при максимальній продуктивності частота проходження спалахів дорівнює 30 Гц, при заявленому числі спалахів  $10^8$  отримуємо менше 1000 год безперервної роботи лампи. За кордоном провідними лідерами з виробництва ксенонових ламп є Ushio (Японія) і Heraeus Noblelight (Німеччина), у РФ подібний тип ламп випускає ВАТ «Завод Стелла», СКТБ «Ксенон».

Переваги ксенонових ламп полягають в тому, що вони екологічно безпечні, оскільки не містять ртуті, і можуть працювати при будь-якій температурі стінки без розігріву. Трубчасті ксенонові лампи, на відміну від інших розрядних ламп, є безбаластними і тому не потребують застосування струмообмежуючих пристроїв. Електричні характеристики лампи визначаються її конструктивними параметрами.

### **1.5 Ексімерні джерела УФ-випромінювання**

Ексилампи (джерела УФ і ВУФ-випромінювання) - джерела спонтанного випромінювання, в яких використовується нерівноважне

випромінювання ексимерних або експлексних молекул [12, 13]. Особливістю цих молекул є їх стійкість в електронозбудженому стані і відсутність міцного зв'язку.

На відміну від імпульсного розряду з безперервним спектром, випромінювання ексимерних молекул має яскраво виражену смугасту структуру спектрального розподілу випромінювання. Ексимерні лампи [12] (ексилампи) випромінюють за рахунок розпаду молекул, що представляють собою збуджений комплекс атомів. Ексимерні молекули є нестійкими хімічними сполуками, що існують тільки в збудженому електронному стані, тому час життя такої молекули обмежений і складає  $10^{-9}$ - $10^{-7}$ с [8].

Ряд таких молекул має інтенсивний *B-X* перехід в УФ або ВУФ-діапазонах спектру, що дозволяє з високою ефективністю трансформувати введену в середу енергію в оптичне випромінювання. Основна відмінність ексиламп від наявних люмінесцентних, а також теплових джерел спонтанного випромінювання УФ і ВУФ-діапазонів - спектр випромінювання. До 80% і більше загальної потужності випромінювання може бути зосереджено в досить вузькій (не більше 10 нм) смузі відповідної молекули. При цьому питомі потужності випромінювання перевищують величини, характерні для ламп низького тиску на резонансних переходах атомів. Крім того, при збудженні багатокомпонентних газових сумішей одночасно можна отримати випромінювання з співмірною інтенсивністю на двох і більше молекулах [14].

Переваги ексиламп з точки зору їх застосування складають велика енергія фотона (3,5 – 10 eV), вузька смуга випромінювання, відносно висока питома потужність випромінювання, можливість масштабування і вибору довільної геометрії поверхні, що випромінює. Окремо слід відзначити відсутність ртуті в ексилампах.

У ексилампах використовуються робочі середовища, що складаються з інертних газів або їх сумішей з галогенами. Особливістю даних середовищ є характер релаксації енергії по електронним станам ексимерних або

ексиплексних молекул, утворених в середовищі в процесі її збудження, і відносно велика енергія фотона, що випромінюється при переході молекули в основний стан [15]. При цьому найбільш інтенсивним є  $B-X$  перехід, в спектрі якого можуть бути присутні слабші смуги  $D-X$ ,  $D-A$ ,  $C-A$  переходів, а також смуги молекул галогенів (таблиці 1.8 та 1.9).

Утворення ексимерних і ексиплексних молекул в робочому середовищі відбувається по різних каналах [15]. Ексимерні молекули виникають в реакції асоціації:



де  $R^*$ ,  $R$  - атоми інертного газу в збудженому і основному станах відповідно.

Таблиця 1.8

Довжини хвиль основних переходів ексимплексних молекул

Атом інертного газу ( $R$ )	Атом галогену ( $Y$ )	Довжина хвилі основних переходів ексимплексних ламп			
		$D_{1/2} \rightarrow X_{1/2}$	$B_{1/2} \rightarrow X_{1/2}$	$C_{3/2} \rightarrow A_{3/2}$	$B_{1/2} \rightarrow A_{1/2}$
<i>Ne</i>	<i>F</i>	106	108	110	111
<i>Ar</i>	<i>F</i>	185	193	203	204
<i>Ar</i>	<i>Cl</i>		175		195
<i>Ar</i>	<i>Br</i>		165	172	183
<i>Kr</i>	<i>F</i>	220	248	275	272
<i>Kr</i>	<i>Cl</i>	200	222	240	235
<i>Kr</i>	<i>Br</i>		207	222	228
<i>Kr</i>	<i>I</i>		190	195	225
<i>Xe</i>	<i>F</i>	264	351		410
<i>Xe</i>	<i>Cl</i>	236	308	345	340
<i>Xe</i>	<i>Br</i>	221	282	300	325
<i>Xe</i>	<i>I</i>	203	253	265	320

Швидкість реакції (1.14) пропорційна квадрату концентрації атомів в основному стані. Цим пояснюється сильна залежність інтенсивності і виду

спектра випромінювання інертного газу від тиску.

Таблиця 1.9

Довжини хвиль переходів ексимерних молекул і гомоядерних  
молекул галогенів

$R_2^*, Y_2^*$	Довжина хвилі, нм
$Ar_2^*$	126
$Kr_2^*$	146
$Xe_2^*$	172
$F_2^*$	158
$Cl_2^*$	259
$Br_2^*$	289
$I_2^*$	342

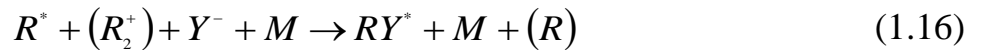
На рисунку 1.18 показана зміна спектра випромінювання ксенону при різних тисках, що збуджується бар'єрним розрядом. Резонансна лінія домінує при низькому тиску. При збільшенні тиску в спектрі спостерігаються дві широкі смуги, умовно названі першим і другим континуумами. До першого відносять переходи з високолежачих коливальних рівнів. Даний континуум прилягає до довгохвильової сторони резонансної лінії. Другий континуум формується переходами з нижніх коливальних рівнів збудженого стану і відповідно розташовується на більшій відстані від резонансної лінії в довгохвильову область. При тиску 100 торр і більш в спектрі домінує випромінювання другого континууму [13].

Ексиплексні молекули формуються за рахунок так званих гарпунних реакцій за участю збудженого атому інертного газу і галогеновмісної молекули



або в процесі іон-іонної рекомбінації позитивного атомарного або

молекулярного іонів інертного газу ( $R^+$ ,  $R_2^+$ ) з негативним іоном галогену  $Y^-$



де  $TY$ ,  $Y_2$  - галогеновмісні молекули,  $Y_2$  - атом галогену,  $M$  - третя частинка, що забирає надлишок енергії. В якості частинки  $M$  можуть виступати атоми робочого або "буферного" інертних газів.

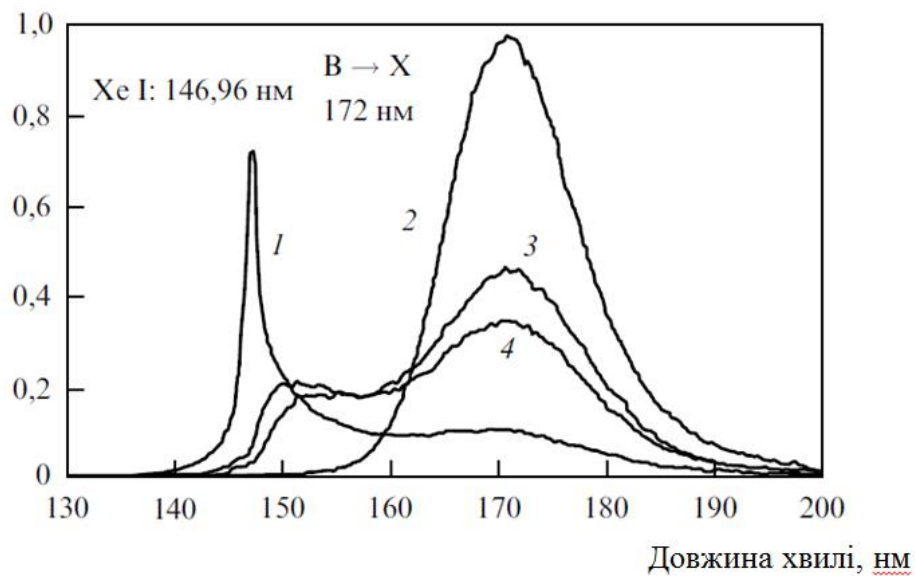


Рис. 1.18 Спектр випромінювання ксенону при різних тисках у випадку збудження бар'єрним розрядом: 1 – 37 торр, 2 – 510 торр, 3 – 75 торр, 4 – 52 торр

Випромінювання ексиламп є вузькосмуговим [13], а максимуми смуг випромінювання в залежності від використовуваної молекули розташовуються в діапазоні від 120 до 360 нм [8]. Найбільш ефективними оптичними середовищами є ксенон (ефективність випромінювання  $\eta$  молекул  $Xe_2^*$  - до 60%, довжина хвилі  $\lambda=172$  нм [18, 19]), суміші  $Kr-Cl_2$ ,  $Xe-Cl_2$  (молекули  $KrCl^*$ ,  $\lambda=222$  нм;  $XeCl^*$ ,  $\lambda=308$  нм,  $\eta \sim 25\%$  [16, 20, 21]),  $Xe-Br_2$  ( $XeBr^*$ ,  $\lambda=282$  нм,  $\eta \sim 15\%$  [22, 23]),  $Xe-I_2$  ( $XeI^*$ ,  $\lambda=253$  нм,  $\eta \sim 20\%$  [24]). Це дає можливість селективно впливати на об'єкти опромінення тими довжинами хвиль випромінювання, які призводять до найбільшого корисного

ефекту, тобто збільшити ККД технологічного процесу, в якому використовується ексилампа. ККД перетворення енергії розряду у випромінювання ексимерних молекул може досягати 25% при малих потужностях (10-20 Вт) і залежить від потужності, що вкладається в розряд (рис. 1.19).

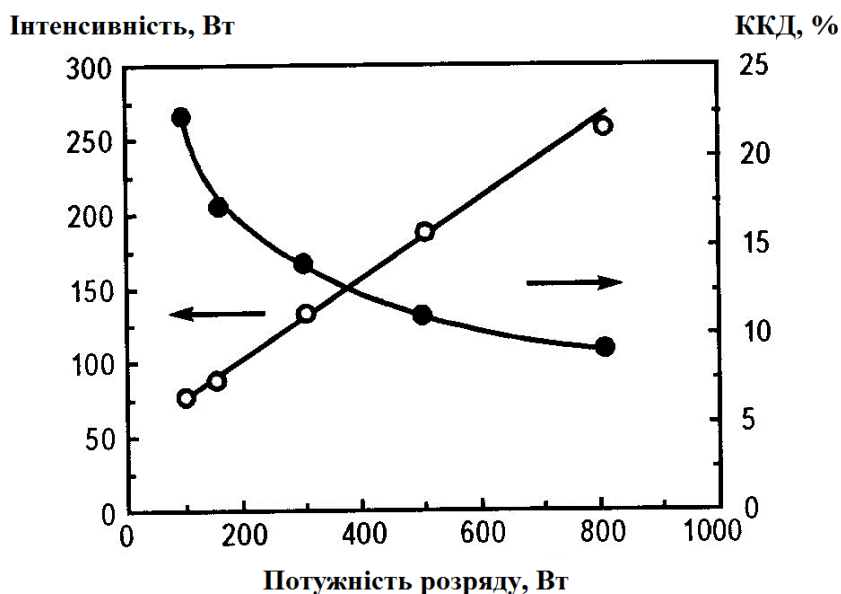


Рис. 1.19 Залежність інтенсивності УФ-випромінювання і ККД ексимерної лампи з наповненням  $KrCl$  (222 нм) від потужності розряду [8]

Ексилампи, що використовують інертні гази або їх суміші з галогенами, екологічно досить безпечні, їх перевагою є практично миттєвий час запалювання, вузька спектральна полоса і досить висока потужність УФ-випромінювання. Вся сукупність їх властивостей дозволяє застосовувати їх для фотохімічних процесів, в аналітичній хімії, фотобіології, мікроелектроніці для обробки поверхні полімерних матеріалів і в різних сферах діяльності людства.

Багато досліджень проводиться у пошуках ефективних люмінофорів, що переводять УФ-випромінювання ексиламп в бактерицидний діапазон або інший необхідний діапазон. Наприклад, випромінювання з довжиною хвилі 172 нм імпульсного розряду в ксеноні конвертують в діапазон 230-300 нм за



допомогою покриття на основі фосфору і спеціальних добавок композицій рідкоземельних металів. При цьому виникають проблеми, пов'язані зі складністю конструкції, складністю у виробництві, з високою чуттєвістю розряду до чистоти матеріалів і газів. ККД генерації УФ-випромінювання бактерицидного діапазону такого джерела не перевищує 15-20%. Їх використання для знезараження в промислових масштабах обмежується високою вартістю, проте для лабораторних робіт вони можуть успішно застосовуватися.

У ексімерних лампах з галогеновим наповненням основним чинником, що обмежує тривалість функціонування ламп, є деградація робочого середовища лампи внаслідок протікання хімічних реакцій галогенів з електродами або з кварцом колби лампи. Крім цього для потужних ламп доводиться застосовувати охолодження, що є додатковим ускладнюючим чинником. Строк служби ексіламп залежить від наявності в колбі хімічно агресивного газу (хлор, фтор), від температурного режиму і від конструкції колби.

Основною перевагою використання ексімерних ламп є екологічність за рахунок відсутності ртуті, швидкий запуск (Instant start), характеристики лампи не залежать від температури навколишнього середовища. Вони можуть мати високу потужність, але для цього потрібна складна і дорога пускорегулююча апаратура. Застосування таких джерел світла в промислових масштабах для знезараження є обмеженим, вони можуть бути успішно використані при вирішенні конкретних фізико-хімічних задач. Наприклад, фірма Philips в 2011р. представила дуже цікавий пристрій для знезараження води для побутового застосування на основі DBD лампи малої потужності, яке отримало назву Instant Trust Philips [4].

В даний час ексіламп починають використовувати в фотохімії, мікроелектроніці, для очищення і модифікації властивостей поверхні, для полімеризації лаків і фарб, в технологіях знезараження промислових відходів, води, повітря, біології, медицині та інших застосуваннях. Це стало можливим

завдяки великим успіхам в розумінні процесів, що відбуваються в оптичних середовищах ексиламп.

Провідним виробником ламп з довжиною хвилі 172 нм, а також і обладнання є фірма Ushio (Японія), яка багато років з успіхом виробляє такі системи.

### **1.6 Напівпровідникові діоди**

Джерелами УФ-випромінювання є також світлодіоди [16, 17]. Щоб створити світлодіоди або лазерні діоди, що випромінюють в УФ-області, необхідно використовувати матеріали з шириною забороненої зони більше 3еВ. Для приладів УФ-діапазону застосовуються широкозонні напівпровідники, такі як GaN, AlGaN і AlN. Так, наприклад, кристал з AlGaN може бути вирощений з детальним складом в широкому діапазоні, від GaN (3,42 еВ) до AlN (6,2 еВ). Рекомбінація електронно-діркових пар в таких матеріалах відбувається переважно з виділенням кванта світла. Енергія кванта пропорційна ширині забороненої зони, тобто енергія, яку повинен затратити заряд для проходження через цю зону. Це дозволило створити світлодіоди УФ-діапазону.

В даний час провідні фірми пропонують до апробації світлодіоди з різними довжинами хвилі випромінювання 250-280 нм в максимумі поглинання бактерицидної кривої. Середня потужність УФ-випромінювання 0,5-2 мВт з ККД 0,01 - 0,015% при довжинах хвиль 250-255 нм; ККД 0,3-0,4% при довжинах хвиль 280-290 нм; ККД до 15% при імпульсному режимі випромінювання (тривалість імпульсу до 100 мкс) в області довжин хвиль 395-410 нм і випромінюваної імпульсної потужності до 0,5 Вт. Такий низький ККД перетворення електричної енергії пояснюється рядом чинників, основними з яких є безвипромінювальна рекомбінація зарядів на дислокаціях, що не потрапили в активний шар, розбіжність постійних решіток напівпровідника і підкладки, підвищений опір р-n-переходів. Тому серйозною

проблемою при створенні напівпровідникових приладів спектрального УФ-діапазону є отримання високолегованих шарів AlGaN n- і p- типу з високим вмістом AlN і забезпечення достатньо низької робочої напруги і малої потужності споживання. В даний час такі роботи активно проводяться.

Час роботи УФ-світлодіодів в теперішній час складає від декількох сотень до десятки тисяч годин. Зменшення величини УФ-випромінювання становить 15-30% після 500-1000 годин роботи.

Недоліки: вкрай низький ККД, низька потужність УФ-випромінювання, що не перевищує декількох міліват, низький ресурс - сотні годин, висока вартість - кілька сотень доларів для бактерицидного діапазону (довжина хвилі 250-265 нм), незважаючи на падіння вартості останнім часом. Наприклад, світлодіод UVTOP275 (Sensor Electronic Technology, Inc.) [18] з потужністю УФ-випромінювання 0,3 мВт коштує 220 дол. (раніше не менше 500 дол.), але все одно ця ціна є неймовірно високою, причому строк служби таких світлодіодів не більше 1000 год. Реальний же ресурс (за даними Roithner Laser Technik) - не більше 300 год. При потужності 0,3 мВт енергоспоживання складає (номінал) 150 мВт, таким чином, ККД дорівнює 0,2%.

Переваги: невеликі розміри, можливість монтажу великої кількості випромінювачів в плоских структурах, монохроматичність випромінювання, можлива передача випромінювання по оптоволоконному кабелю. Таким чином, можна зробити висновок, що застосування світлодіодів бактерицидного УФ-діапазону для знезараження в даний час недоцільно, так як вони поступаються за параметрами практично всім газорозрядним джерелам УФ-випромінювання.

## Висновки до розділу

1. Серед різних типів джерел УФ-випромінювання ртутні розрядні лампи отримали найбільш широке застосування. Розряд в парах ртуті випромінює в усіх діапазонах УФ-спектру, ртуть має високу потужність пару, що дозволяє створити різні конструкції ламп з тиском пару від 1,3 Па до  $1,3 \cdot 10^6$  Па, ртуть хімічно мало активна і майже не взаємодіє з матеріалами колби та електродів, що забезпечує досить високу надійність і строк служби ламп.

2. Ртутні лампи низького тиску через невеликі градієнти потенціалу і малі густини струму мають високий вихід резонансного випромінювання в УФ-діапазоні спектру 184,9 нм та 253,7 нм, але мають великі розміри при малих потужностях. За рахунок використання фотолюмінісцентного перетворення короткохвильового випромінювання створені лампи з більш довгохвильовим УФ-випромінюванням в області спектру 280-400 нм. Електричні та випромінювальні характеристики ртутних ламп низького тиску залежать від коливань напруги мережі. Строк служби ламп низького тиску залежить від типу баласту: при використанні пускового апарату типу дросель – 5-9 тис. годин, а при використанні електронних пускових апаратів 16-18 тис. годин.

3. Амальгамні лампи характеризуються малим вмістом ртуті, джерелом випромінювання яких є дуговий розряд в парах ртуті та інертних газах. За рахунок використання амальгами підтримується оптимальний постійний тиск парів ртуті при значно більших струмах, і відповідно потужностях, чим у традиційних лампах низького тиску. Потужність амальгамних ламп від 50 до 1000 Вт (електрична потужність розряду складає 2-3 Вт/см) з ККД від 25 до 42 %, при розрядах струму від 1 до 7 А, спад УФ-випромінювання до кінця строку служби 5-30 % і корисним строком служби від 8 до 18 тис. годин. Використання багатокомпонентних амальгамних ламп дозволяє отримувати джерела випромінювання з декількома максимумами потужності випромінювання за температурою. Вибір амальгами здійснюється експериментальним шляхом, що не завжди є простою задачею для вирішення.

Це і обмежує широке використання амальгамних ламп в різних сферах діяльності людства з метою бактерицидного знезараження.

4. Одним з найбільш ефективних УФ-джерел світла є металогалогенні лампи, що мають високий ККД перетворення електричної енергії в УФ-випромінювання і можливість в широких межах регулювати спектр випромінювання. В залежності від характеру задачі можливо змінювати питому потужність, геометрію пальника, кількість ртуті й випромінюючих домішок, силу струму в лампі. Інші параметри (температура, пальника, тиск парів домішки і ртуті, радіус розрядного каналу та ін.) є залежними, тому, зі зміною питомі теплові втрати розрядного стовпа  $P_{\text{ист}}$  одночасно змінюється декілька факторів від котрих в різній мірі залежить променистий потік лампи.

5. На основі індукційного розряду трансформаторного типу створені ефективні та потужні джерела бактерицидного випромінювання. Їх характеристики по ККД і потужності УФ-випромінювання подібні електродним лампам низького тиску. Строк служби таких виробів істотно вище, ніж у ламп низького тиску за рахунок відсутності електродних вузлів. За рахунок зниження тиску наповнюючого газу, збільшуючи ефективність розряду. Лімітуючим чинником фізичного ресурсу горіння системи лампа - ПРА в цьому випадку виступає не тільки потемніння стінки колби, а й вихід з ладу електронних компонентів пускорегулюючих пристроїв. При живленні безелектродних ламп частотами вище 400 МГц відбуваються процеси руйнування внутрішньої стінки кварцу за рахунок взаємодії високочастотної плазми з кварцом при високих температурах, що призводить до погіршення запалювання лампи і спаду інтенсивності УФ-випромінювання. ККД таких ламп може досягати 30%, проте широкого застосування, через необхідність формування розряду в замкнутому контурі і через складність пускорегулюючого апарату і великих габаритів випромінювача.

6. Строк служби ксенонових імпульсних ламп визначається числом спалахів, що становить  $10^7$ - $10^8$ . При такому числі спалахів час безперервної роботи лампи буде менше 1000 годин. Зменшення потужності

УФ-випромінювання до кінця строку служби становить 50% від початкової величини. Для запалювання імпульсних ксенонових ламп потрібно пробійна напруга більше 1 кВ, що ускладнює їх застосування за рахунок громіздкої пускорегулювальної апаратури. Високий вміст ультрафіолетового випромінювання в спектрі імпульсних ксенонових ламп визначає доцільність їх застосування в тих випадках, коли потрібне отримання потужних короткочасних потоків УФ-випромінювання.

7. Ексімерні лампи з галогеновим наповненням є екологічними за рахунок відсутності ртуті, характеризуються швидким запуском, параметри лампи не залежать від температури навколишнього середовища. ККД генерації УФ-випромінювання бактерицидного діапазону не перевищує 15-20%. Основним чинником, що обмежує тривалість функціонування ламп є висока чуттєвість розряду до чистоти матеріалів і газів. Строк служби ексиламп залежить від наявності в колбі хімічно агресивного газу (хлор, фтор), від температурного режиму і від конструкції колби. Для їх використання потрібна складна і дорога пускорегулююча апаратура. Застосування таких джерел світла в промислових масштабах для знезараження є обмеженим, вони можуть бути успішно використані при вирішенні конкретних фізико-хімічних задач в лабораторних дослідах.

8. Світлодіоди, що випромінюють в УФ області мають низький ККД, низька потужність УФ-випромінювання, що не перевищує декількох міліват, низький ресурс - сотні годин, висока вартість - кілька сотень доларів для бактерицидного діапазону (довжина хвилі 250-265 нм). При потужності 0,3 мВт енергоспоживання складає (номінал) 150 мВт - ККД дорівнює 0,2%. Світлодіоди в УФ-області мають невеликі розміри, можливість монтажу великої кількості випромінювачів в плоских структурах, монохроматичність випромінювання, можлива передача випромінювання по оптоволоконному кабелю.

## РОЗДІЛ 2 ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛАМП І ЛАМПОВИХ СИСТЕМ

### 2.1 Методика вимірювання потужності УФ-випромінювання ламп низького тиску

Вимірювання потужності УФ-випромінювання ламп представляє собою комплексну складну задачу [19]. Якщо геометричні розміри лампи не надто великі, то найкращим рішенням є використання інтегруючої сфери. Вимірювання, виконані в світлотехнічній кулі, вважаються найбільш достовірними, однак для застосування даної методики для ламп з довжиною розрядного проміжку більше 2 м потрібні сфери з діаметром близько 12 м, що представляє складності при практичній реалізації таких вимірів.

Більшість бактерицидних ламп низького тиску є трубчастими лампами з довжиною колби 1-2,5 м, тому інтегруючі сфери для таких довгих ламп, як правило відсутні, або можуть бути в одиничних екземплярах в спеціальних лабораторіях. У зв'язку з цим необхідно застосовувати інші методи вимірювань. Для вирішення цього завдання необхідно забезпечити точне вимірювання опромінення в деякій точці простору, розташованої на відстані від джерела світла, і провести розрахунок повного потоку випромінювання від джерела за результатами вимірювань опромінення. Можливі різні схеми вимірювань, що включають в себе геометрію відносного розташування лампи і датчика і методику розрахунку повного потоку випромінювання по опроміненні в заданій точці.

Розглянемо можливі схеми вимірювання повного світлового потоку від трубчастої амальгамної лампи низького тиску.

Трубчаста УФ-лампа низького тиску має ряд особливостей, що дозволяють спростити вимірювання потужності УФ-випромінювання. Оскільки в УФ-діапазоні лампа випромінює тільки одну лінію, то для вимірювань найкраще використовувати датчики, які не реєструють випромінювання видимого та ближнього УФ-діапазону. Датчик можна

відкалібрувати і атестувати на довжині хвилі 254 нм і проводити вимірювання опромінення відкаліброваним датчиком без будь-яких спектральних пристроїв (монохроматор, фільтр і т. п.). Природно, що для зменшення похибки вимірювань і зменшення впливу фонового опромінення слід застосовувати додаткові спектральні прилади. При вимірах також можна враховувати, що окремі елементи циліндричної поверхні лампи випромінюють рівномірно. Таким чином, досить визначити опромінення в деякій точці простору біля лампи і вирішити зворотну задачу отримання потужності УФ-випромінювання всієї лампи по опроміненню датчика.

Провідними виробниками ламп для вимірювання потужності УФ-випромінювання трубчастих ламп застосовуються методики на основі моделі Кайтца (Keitz) [20, 21]. Схема вимірювання наведена нижче (рис. 2.3). При такому взаємному розташуванні лампи і детектора УФ-випромінювання повний світловий потік лампи може бути розрахований за формулою:

$$P_{254} = \frac{2\pi^2 L h I}{2\alpha + \sin(2\alpha)} \quad (2.1)$$

де  $L$  - довжина лампи;  $h$  - відстань від лампи до датчика;  $I$  - опроміненість датчика;  $\alpha$  - кут, позначений на рис. 2.1.

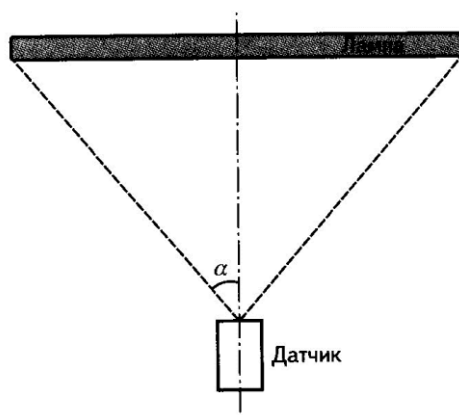


Рис. 2.1 Схема вимірювання по моделі Кайтца



Наведена вище формула Кайтца отримана для нескінченно тонкого стрижня з рівномірно розподіленою по довжині світністю. Отже, цю модель можна застосовувати з наступними обмеженнями:

- відстань від лампи до датчика повинна бути достатньо великою, щоб лампу можна було вважати нескінченно тонкою;
- відстань від лампи до датчика повинна бути достатньою для того, щоб все промені потрапляли в апертуру датчика.
- не допускається нерівномірностей в випромінюванні по довжині лампи.

Таким чином, для застосування даної методики вимірювання необхідна окрема кімната зі стінами, що поглинають УФ-випромінювання. Для лампи довжиною понад 2 м рекомендована відстань становить більше 5 м.

При великих відстанях між датчиком і лампою на вимірювання впливає сильне відбивання випромінювання, що призводить до великої похибки вимірювань, оскільки величина сигналу від лампи падає, а величина відбитого (фонового) сигналу змінюється незначно. Тому для вимірювання потужності УФ-випромінювання можна застосовувати модернізовану схему вимірювання [8], що включає в себе додаткову щілину (рис. 2.2). При застосуванні даної методики на датчик потрапляє випромінювання не від всієї лампи, а тільки від малої її частини, вирізаної щілиною. Такий підхід дозволяє істотно скоротити мінімальні відстані і площі, що займає установка, і зменшити на практиці значення похибки вимірювань. Обслуговуючий персонал також може знаходитися в тому ж приміщенні з вимірюваною лампою. Розрахункова формула для наведеної на рис. 2.2 схеми вимірювання наступна:

$$P_{254} = \frac{\pi^2 L h d I}{\Delta} \quad (2.2)$$

де  $L$  - довжина лампи (450 – 2400 мм);  $h$  - відстань від лампи до датчика (1600 мм);  $I$  - опроміненість датчика;  $d$  - відстань від щілини до фотоелемента (1500 мм);  $\Delta$  - ширина щілини (30 мм).

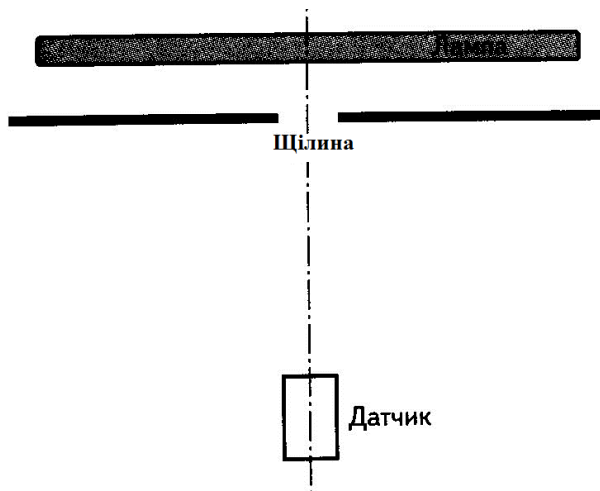


Рис. 2.2 Схема вимірювання УФ-випромінювання

Похибка вимірювання при використанні даної методики визначається точністю калібрування датчика УФ-випромінювання, точністю дотримання геометричних розмірів при взаємному розташуванні вимірюваної лампи, щілини, датчика і точністю вимірювання фотоструму. Відстань між лампою і датчиком 1500 мм, відстань між щілиною і лампою 100 мм. Відносна похибка визначення потужності УФ-випромінювання з використанням описаної вище методики з урахуванням випадкових помилок вимірювання складає 8%, причому основний внесок в похибку вносить точність калібрування УФ-датчика, яка становить близько 7%.

Варто відзначити, що найчастіше визначення абсолютного значення потужності УФ-випромінювання не потрібно, достатньо визначити різницю двох потужностей або їх відношення, наприклад, при проведенні ресурсних випробувань ламп або при порівнянні характеристик різних ламп. При визначенні різниці або відношенні потужностей УФ-випромінювання похибка калібрування вже не впливає на точність вимірювань [8].

## 2.2 Методика контролю потоку випромінювання бактерицидних ламп в процесі їх експлуатації

При зниженні бактерицидного потоку УФ-ламп опромінювальні установки перестають виконувати своє призначення [5].

Критерієм не відповідності УФ-ламп в опромінювальних установках є зниження їх потоку нижче 50 % [22] від номінального значення при номінальній напрузі мережі, а також нестійке горіння при зниженому значенні напруги мережі.

Спад потоку ламп в процесі експлуатації компенсується, для збереження необхідного значення дози, 2-х кратним збільшенням початкового значення нормованого часу опромінення, при якому зберігається досягнення заданої бактерицидної ефективності [3, 5].

Розглянемо порядок здійснення метрологічного контролю стану бактерицидних ламп [22, 31].

Проводиться перевірка функціонування. При цьому лампи повинні запалюватися не більше, ніж за 10 с при номінальному значенні напруги мережі ( $U_H$ ) і не більше ніж за 1 хв при зниженому значенні напруги мережі ( $0,9U_H$ );

Через 10 хв після запалювання лампи вимірюється опроміненість, що пропорційна потоку випромінювання, вимірюють радіометром «Аргус-06», Тензор-31 або будь-яким іншим атестованим радіометром у ранзі робочого засобу вимірювань, за умови, що його основна відносна похибка  $\sigma$  не більша ніж 10 %. Динамічний діапазон вимірюваної опроміненості при похибці 10 % для «Аргуса-06» рівний  $1 \cdot 10^{-3} - 2,00 \text{ Вт/м}^2$ , для «Тензора-31» –  $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^2$ .

Для оцінки похибки при вимірюванні потоку випромінювання використовують «робочі еталони» (РЕ). Потік випромінювання РЕ при номінальній напрузі мережі повинен відрізнятись не більш, ніж на + 5 % від номінального значення, вказаного в ТУ на лампи, що використовують в

опромінювачах. Потік випромінювання лампи при відборі РЕ визначають формулою:

$$\Phi_p = \Omega_{\text{ц}} I = \Omega_{\text{ц}} E'_p \lambda^2 \quad (2.3)$$

де  $\Omega_{\text{ц}}$  – еквівалентний тілесний кут, рівний для газорозрядного циліндрового випромінювача 11,3 ср, згідно [23, 24];  $I$  – сила випромінювання лампи, Вт/ср;  $E'_p$  – опроміненість, Вт/м<sup>2</sup>, виміряна радіометром;  $\lambda$  – відстань між лампою і радіометром у метрах. При відношенні довжини випромінювальної частини лампи,  $L$  до  $\lambda$  не більше 0,2 відносна похибка за рахунок відхилення від закону квадрата відстані не більше ніж 1 % [25].

Згідно [26] при  $L/\lambda < 0.2$ :

$$E''_p = I \frac{(f + 0.5 \sin 2f)}{L\lambda}, \quad \text{Вт/м}^2 \quad (2.4)$$

де  $f = \arctg(L/2\lambda)$ , рад – кут, під яким видно половину випромінювальної частини лампи із точки безпосередньо під лампою, де розташований радіометр;  $E''_p$  – сумарна опроміненість від двох симетричних (лівої і правої) випромінювальних частин лампи, виміряна радіометром у цій точці, Вт/м<sup>2</sup>.

Використовуючи формулу (2.4) і зробивши відповідні перетворення, отримаємо формулу для визначення потоку випромінювання:

$$\Phi_p = \frac{E''_p L \lambda \Omega_{\text{ц}}}{(f + 0.5 \sin 2f)}, \quad \text{Вт} \quad (2.5)$$

Відносну похибку відхилення від закону квадрата відстані залежно від відношення  $L/\lambda$  можна обчислити за формулою:

$$\sigma = (1 - E'_p / E''_p) \cdot 100, \% \text{ або}$$

$$\sigma = \left\{ 1 - \frac{L}{\lambda} \left( \arctg \frac{L}{2\lambda} \right) + 0.5 \sin 2 \arctg \left( \frac{L}{2\lambda} \right) \right\} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

Значення відносної похибки відхилення від закону квадрата відстані, що обчислено за формулою (2.6), для лампи з довжиною частини, що світить  $L = 0,8$  м при  $\lambda = 1, 2, 3$  і  $4$  м складає  $\sigma = 10, 3, 2, 6$  і  $1$  %, відповідно.

При визначенні потоку випромінювання РЕ необхідно оцінювати основну відносну похибку вимірювання  $\Delta$ , використовуючи методи математичної статистики. Для цього необхідно провести  $n \geq 6$  вимірювань значення опроміненості  $E_1$  від кожної лампи і обчислити значення потоку випромінювання  $\Phi_{P(l)}$  за формулою (2.5). Далі:

- визначають середнє арифметичне значення потоку випромінювання:

$$\overline{\Phi}_p = \frac{\sum_{l=1}^{l=n} \Phi_{P(l)}}{n} \quad (2.7)$$

- відносне середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань визначають формулою:

$$\sigma_{\text{відн}} = \frac{\left[ \frac{\sum_{l=1}^{l=n} (\Phi_{P(l)} - \overline{\Phi}_p)^2}{n(n-1)} \right]^{0,5}}{\overline{\Phi}_p} \times 100, \% \quad (2.8)$$

- значення коефіцієнта Стюдента для довірчого вірогідності  $0,95$  визначають формулою:

$$t_{0,95} = 2 \cdot \left[ \frac{n-1}{n-3} \right]^{0,5} \quad (2.9)$$

- довірчі границі (без урахування знаку) випадкової похибки результату вимірювань визначають формулою:

$$\varepsilon = t_{0,95} \cdot \sigma_{\text{відн}} \quad (2.10)$$

- якщо  $\theta / \sigma_{\text{відн}} \leq 0,8$ , тоді невиключною систематичною похибкою в порівнянні з випадковою нехтують і приймають за похибку результату вимірювань  $\Delta = \varepsilon$ ;
- якщо  $\theta / \sigma_{\text{відн}} > 8$ , тоді випадковою похибкою в порівнянні з систематичною нехтують і приймають, що межа похибки результату вимірювань  $\Delta = \theta$ ;
- якщо  $\theta / \sigma_{\text{відн}} < 8$ , тоді похибка результату вимірювань  $\Delta = \theta + \varepsilon$ .

Результати вимірювань вважають задовільними, якщо  $\Delta \leq 15\%$ .

## **Висновки до розділу**

1. Для вимірювання потужності УФ-випромінювання трубчастих ламп застосовуються методики на основі моделі Кайтца. Похибка вимірювання при використанні даної методики визначається точністю калібрування датчика УФ-випромінювання, точністю дотримання геометричних розмірів при взаємному розташуванні вимірюваної лампи, щілини, датчика і точністю вимірювання фотоструму. Відносна похибка визначення потужності УФ-випромінювання з використанням описаної методики складає 8%, причому основний внесок в похибку вносить точність калібрування УФ-датчика.

2. При визначенні потоку випромінювання оцінюють відносну похибку вимірювання, використовуючи методи математичної статистики, при цьому кількість вимірювань опроміненості від кожної лампи повинна бути не менше 6 раз. Опроміненість, що пропорційна потоку випромінювання, вимірюють атестованим радіометром, за умови, що його основна відносна похибка не перевищує 10 %.

3. Критерієм не відповідності УФ-ламп в опромінювальних установках є зниження їх потоку нижче 50 % від номінального значення при номінальній напрузі мережі, а також їх нестійке горіння. При проведенні ресурсних випробувань ламп або при порівнянні характеристик різних ламп визначення абсолютного значення потужності УФ-випромінювання не потрібно, достатньо визначити різницю двох потужностей або їх відношення.

### **РОЗДІЛ 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПОЖИВНИХ ПЕРЕВАГ ТА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ УФ-ДЖЕРЕЛ СВІТЛА В РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ**

#### **3.1 Прогнозування корисного строку служби ультрафіолетових ламп низького тиску за стабільністю променевого потоку**

Для проектування опромінювальних установок з використанням УФ-С важливо знати як змінюється променевий потік джерела в процесі строку служби. Сьогодні, як джерела УФ-С випромінювання, широко використовуються ртутні розрядні лампи низького тиску в колбах із кварцевого та увіолевого скла [3, 5]. Відомо, що в процесі строку служби відбувається зниження потоку ультрафіолетового випромінювання через окислення ртуті в лампі і осіданням продуктів реакції на внутрішню поверхню колби, напilenня матеріалів електродів на колбу і утворення амальгам, зниження прозорості кварцевого та увіолевого скла під дією УФ-випромінювання та інших факторів [27]. Зниження променевого потоку також може відбуватися через зміну в процесі строку служби електричних параметрів ламп, наприклад через зниження потужності.

Для ламп, що використовуються в опромінювальних установках фотобіологічної дії, наприклад в установках бактерицидного знезараження води, важливо знати параметри УФ-С потоку в процесі строку служби і прогнозувати час, протягом якого можна експлуатувати конкретні типи ламп і забезпечувати необхідний рівень опроміненості, тобто прогнозувати корисний строк служби ламп. Корисний строк служби - це час протягом якого променевий потік лампи при певних режимах живлення і умовах експлуатації не зменшується нижче встановленого рівня, наприклад 70% початкового значення.

Механізм і ступінь впливу, вище вказаних факторів, для різних конструкцій ламп, режимів живлення, а також умов експлуатації не достатньо вивчені, тому дослідження зміни променевого потоку в процесі експлуатації ультрафіолетових ламп та прогнозування їх корисного строку служби є



питаннями актуальними.

Математичну модель спаду променевого потоку УФ-С розрядної лампи низького тиску можна побудувати використовуючи метод математичної екстраполяції наступним чином.

На основі значень променевого потоку  $F_1, F_2 \dots F_m$  отриманих вимірюваннями у момент часу  $t_1, t_2 \dots t_m$  потрібно підібрати таку функцію  $F = F(t)$ , яка описує процес не тільки в середині інтервалу часу  $(t_1, t_m)$  але і поза ним (в точках  $t_{m+1}, t_{m+2} \dots t_{m+m}$ ). Точність оцінювання променевого потоку в значній мірі залежить від підбору емпіричної функції. Вид функції можна приблизно вгадати, якщо помістити дані вимірювання в декартову систему координат і з'єднати їх плавною кривою, а потім порівняти отриману криву із графіком уже відомої функції.

За допомогою комп'ютерних програм можна знайти коефіцієнти одночасно для кількох видів емпіричних формул і порівняти розраховані по ним значення з даними вимірювань. Для цього виникає необхідність розробки алгоритмів розрахунку зазначених коефіцієнтів. Найбільшого застосування (при порівняно нескладних розрахунках) отримав метод найменших квадратів.

При обробці результатів вимірювань з виявлення функціональної залежності між параметрами необхідно розрахувати значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma$ , відхилення в кожній точці  $\varepsilon_i$ , а також відносну похибку між вимірюваннями і розрахунковими даними. За величиною середньоквадратичного відхилення можна судити про близькість розміщення експериментальних і розрахункових точок, а за знаками відхилень – про розміщення експериментальних і розрахункових точок відносно графіка емпіричних функцій.

Обробку експериментальних даних по виявленню закону спаду променевого потоку доцільно спочатку проводити за результатами завершених досліджень. Вибір функції здійснюється як за величиною

середньоквадратичного відхилення, так і за значенням відносної похибки у вимірюваних точках.

Після вибору функції виникає питання встановлення передісторії, тобто визначення кількості точок вимірювання променевого потоку в процесі горіння ламп за якими буде будуватись тренд. Як правило, чим більша тривалість передісторії, тим точніший прогноз.

Як приклад прогнозування корисного строку служби за спадом світлового потоку можна взяти методики для світлодіодних модулів [28]. При цьому строк служби визначається як період часу протягом якого джерело світла випромінює задану величину світлового потоку.

Нами була взята за основу методика прогнозування спаду світлового потоку світловипромінюючих діодів, яка описана в [29, 30], де рекомендованим методом прогнозування корисного строку служби за спадом світлового потоку є підбір емпіричної експоненціальної кривої для опису отриманих даних по спаду світлового потоку для кожної умови випробувань. Подальша екстраполяція цієї підібраної функції до моменту часу, де світловий потік зменшується до певного прийнятого рівня (наприклад до 80, 70 або 60 % від початкового потоку) дозволяє оцінити величину корисного строку служби. Підбір емпіричної експоненціальної кривої спаду променевого потоку  $F(t)$  за час  $t$ , яка має загальний вигляд:

$$F(t) = B \exp(-\alpha t), \quad (3.1)$$

здійснюється знаходженням величини  $B$  - початкової постійної, і  $\alpha$  - постійної швидкості спаду променевого потоку за методом найменших квадратів. Після розрахунку постійних  $B$  та  $\alpha$  шукане значення тривалості горіння (строку служби  $\tau_p$ ) протягом якого відбувається зменшення до заданого рівня променевого потоку розраховується із виразу:

$$\tau_p = \frac{\ln\left(100 \cdot \frac{B}{p}\right)}{\alpha} \quad (3.2)$$

де  $p$  – заданий рівень від початкового значення променевого потоку.

При рекомендованому рівні  $p = 0,7$  маємо:

$$\tau_{70} = \frac{\ln\left(100 \cdot \frac{B}{0,7}\right)}{\alpha} \quad (3.3)$$

Підбір за методом найменших квадратів здійснюється наступним чином:

Взявши логарифм від обох частин (3.1) маємо

$$\ln F(t) = \ln B \exp(-\alpha t) \quad (3.4)$$

Позначивши  $\ln F(t) = y$ ,  $-\alpha = m$ ,  $b = \ln B$

Отримуємо рівняння прямої:

$$y = mx + b \quad (3.5)$$

Для набору  $n$  експериментальних точок на графіку  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ...,  $(x_n, y_n)$  метод найменших квадратів для величин  $m$  та  $b$  дасть відповідно:

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.6)$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n} \quad (3.7)$$

де  $n$  – загальна кількість усереднених експериментальних точок  $x_k = t_k$ ,  
 $y_k = \ln F_k$ ,  $k = 1, 2 \dots n$ .

Провівши необхідні розрахунки і зворотні перетворення знаходимо  
 $B = \exp b$ ,  $\alpha = -m$ .

Нами проведені дослідження зниження променевого потоку УФ-С в процесі горіння розрядних ламп низького тиску потужністю 20 Вт типу ZW20D15W(Y) в схемі з електронним ПРА торгівельної марки «Tridonic». Колби ламп виготовлені із кварцевого скла. Випробування ламп проводили при напрузі живлення 220В, в режимі 8-ми разового вимикання протягом доби на час по 15 хв. Вимірювання потоку випромінювання в діапазоні довжин хвиль УФ-С проводили з використанням радіометра енергетичної освітленості ультрафіолетового діапазону (Тензор-31) згідно з [31] після 100 год., 500 год. і далі через кожні 500 год. до 6000 год.

Результати вимірювання променевого потоку та результати розрахунків наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати вимірювання променевого потоку та розрахунків при підбиранні  
 емпіричної кривої методом найменших квадратів

Час, год	Відносний потік, відн. од.	$\ln F(t)$	$x$	$y$	$xy$	$x^2$
1	2	3	4	5	6	7
100	1					
500	0,97	-0,0305	500	-0,03	-15,3	250000
1000	0,93	-0,0726	1000	-0,07	-72,6	1000000
1500	0,92	-0,0834	1500	-0,08	-125,1	2250000
2000	0,90	-0,1054	2000	-0,11	-210,8	4000000
2500	0,88	-0,1278	2500	-0,13	-319,5	6250000

3000	0,86	-0,1508	3000	-0,15	-452,4	9000000
3500	0,85	-0,1625	3500	-0,16	-568,8	12250000
4000	0,82	-0,1985	4000	-0,20	-794,0	16000000
5000	0,79	-0,2357	5000	-0,24	-1178,5	25000000
6000	0,75	-0,2877	6000	-0,29	-1726,2	36000000
Суми		-1,4549	25000	-1,46	-5463,2	112000000
$m$						-0,0000366
$b$						-0,0545
$\alpha$						0,0000366
$B$						0,9469585
Розрахунковий $\tau_{60}$						12467,9
Розрахунковий $\tau_{70}$						8256,15
Розрахунковий $\tau_{80}$						4607,75

Отриманий прогноз корисного строку служби досліджених УФ-ламп за зниженням променевого потоку до рівня 0,8 початкового значення становить 4,6 тис. год., до рівня 0,7 початкового значення – 8,3 тис. год, а до рівня 0,6 початкового значення становить 12,5 тис. год.

Розрахунки проводили за результатами вимірювання до 3000 год. Для оцінки точності прогнозу випробування продовжили до 6000 год. і оцінили відносну похибку прогнозу від експериментальних даних в точках вимірювання. Похибка не перевищувала  $\pm 3\%$ .

### **3.2 Переваги та недоліки використання імпульсних електророзрядних УФ-джерел світла в різних технологічних процесах**

В якості джерел бактерицидного УФ випромінювання [1, 3, 32] зазвичай використовується електрична дуга в парах ртуті. Лампи низького тиску мають високий ККД (35–50% перетворення електричної енергії в УФ випромінювання з довжиною хвилі 254 нм при потужності розряду до 2–3 Вт/см. Лампи високого тиску мають низький ККД (10–15%) в області бактерицидного УФ, проте їх потужність на порядок вища, ніж ламп низького тиску. Істотним недоліком ртутних бактерицидних ламп є наявність металевої ртуті [2]. У ртутних лампах низького тиску міститься від 3 до 10 мг ртуті, а в лампах високого тиску - сотні міліграм. Постійне підвищення вимог по екологічній безпеці і введення додаткових обмежень на використання металевої ртуті стимулювали розробки нових джерел бактерицидного УФ випромінювання. Останнім часом досягнуті серйозні успіхи в розробці нового покоління УФ ламп низького тиску, в яких джерелом пари ртуті служить амальгама. Основна маса ртуті знаходиться в зв'язаному стані (амальгамі), а у вільному – тільки 0,03 мкг на лампу, тому тиск парів ртуті при температурі до 50<sup>0</sup>С нижче ГДК. Амальгамні лампи мають високий ККД (35–45%) та ресурс 12000–16000 годин.

Нині велика увага приділяється розробці безртутних джерел УФ випромінювання на основі імпульсних розрядів в інертних газах і їх сумішах з галогенами (ексимерні суміші) [1, 33], у спектрі випромінювання яких міститься значна доля УФ випромінювання. Оскільки пікова потужність імпульсу випромінювання ксенонової лампи може складати 3–10 МВт, то виникає природне питання, чи є відмінності при бактерицидній обробці середовищ УФ випромінюванням такої імпульсної лампи і звичайних ртутних ламп. Широкий спектр імпульсного розряду ставить також питання - чи впливає на процес знезараження імпульсне випромінювання видимого діапазону. Дослідження дезінфекції імпульсним випромінюванням показали,

що при перевищенні імпульсом випромінювання порогової потужності, окрім «звичайної» бактерицидної дії, може реалізуватися ще додатковий механізм дії УФ випромінювання на мікроорганізми - імпульсний нагрів [34, 35].

УФ випромінювання з бактерицидного діапазону 205–315 нм завжди виконує бактерицидну дію, яка полягає в поглинанні УФ фотонів молекулами ДНК усередині клітини, розривом зв'язків в молекулі ДНК і утворенням нових зв'язків, в результаті чого мікроорганізм втрачає здатність до відтворення. Крива ефективності бактерицидної дії УФ випромінювання залежно від довжини хвилі добре узгоджується з кривою поглинання УФ випромінювання молекулами ДНК. Максимум цієї кривої знаходиться в області 265 нм [1, 3], тому випромінювання ртутних ламп низького тиску з довжиною хвилі 254 нм володіє високою бактерицидною ефективністю. Число мікроорганізмів  $N$ , що вижили, експоненціально падає із зростанням отриманої енергії (бактерицидної дози  $D$ ), а саме:

$$N = N_0 \exp(-kD) \quad (3.2)$$

де  $N_0$  – число початкових мікроорганізмів,  $k$  – константа, що характеризує міру чутливості цього виду мікроорганізму до УФ опромінення.

Величина УФ дози, необхідної для десятиразового зменшення, залежить від виду мікроорганізму і для багатьох бактерій і вірусів лежить в області 2–20 мДж/см<sup>2</sup> [1, 3]. Для більшості практичних застосувань величина бактерицидної дози  $D$  визначається не піковим значенням інтенсивності випромінювання, а інтегралом бактерицидної опроміненості  $E(\lambda, t)$  за часом дії  $t$  [1, 3, 32]:

$$D = \iint E(\lambda, t) S(\lambda) d\lambda dt \quad (3.3)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі,  $S(\lambda)$  - відносна бактерицидна ефективність залежно від

довжини хвилі.

На рисунку 3.1 показаний приклад визначення бактерицидної ефективності імпульсної ксенонової лампи  $S_\lambda I_\lambda$ , а також приведені відносна спектральна крива бактерицидної дії  $S_\lambda$  і розподіл енергії випромінювання по спектру імпульсної ксенонової лампи в діапазоні 200–300 нм  $I_\lambda$ .

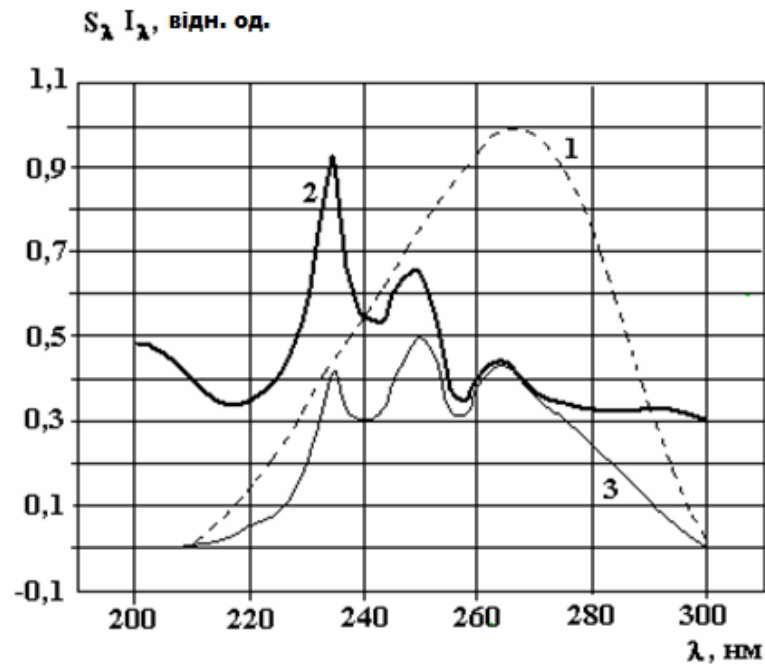


Рис. 3.1 Визначення бактерицидної ефективності імпульсної ксенонової лампи  $S_\lambda I_\lambda$ . 1 – відносна спектральна крива бактерицидної дії  $S_\lambda$ , 2 – розподіл енергії випромінювання по спектру імпульсної ксенонової лампи в діапазоні 200–300 нм  $I_\lambda$ , 3 – добуток  $S_\lambda I_\lambda$  [8]

Питання про відмінності дії імпульсного випромінювання в порівнянні з безперервним досліджувалося в США і Німеччині [34, 35], у Росії [36], Японії [37], Канаді [38] і інших країнах. Перші дослідження процесу дезінфекції потужними імпульсними лампами були виконані в Японії, і імпульсна технологія запатентована в 1984 році [39]. У ранніх роботах зроблено припущення, що при потужній імпульсній дії в процесі дезінфекції бере участь не лише УФ-випромінювання, але і видиме світло. Проте через 15 років було доведено, що в процесі знезараження імпульсним випромінюванням



основний вклад вносять УФ фотони.

До теперішнього часу встановлено, що імпульсне випромінювання має бактерицидну дію і механізм його дії на мікроорганізми залежить від пікової щільності потужності УФ випромінювання, причому для кожного виду мікроорганізмів існує своє значення пікової потужності. Згідно з отриманими даними [6, 7], механізм дезінфекції імпульсним випромінюванням має дві складові: одна з них - загальновідома дія бактерицидним УФ випромінюванням, інша - руйнування мікроорганізму в результаті його перегрівання при поглинанні всього УФ випромінювання. При піковій щільності потужності УФ випромінювання нижче пікового значення знезараження визначається тільки УФ випромінюванням бактерицидного діапазону 205–315 нм, і міра знезараження залежить від інтегральної бактерицидної дози згідно з формулою 3.3.

При високій щільності імпульсного випромінювання, коли сумарна щільність потужності УФ випромінювання в спектральних діапазонах А, В, С (200–400 нм) вища за пікову, швидкість підведення променистої енергії перевищує швидкість передачі теплової енергії мікроорганізмом в довкілля, і відбувається перегрівання мікроорганізму, що призводить до його дезінтеграції [3]. Експериментально показано, що випромінювання у видимій області спектру не вносить істотного вкладу в нагрів мікроорганізмів. Рівень необхідної щільності потужності залежить від термостійкості опромінюваних мікроорганізмів і середовища, що їх оточує. Для стабільної дезінтеграції потрібний нагрів до температури більше 130°C, при якій відбуваються безповоротні зміни, аж до закипання рідини усередині мікроорганізму і викиду її назовні [40].

Згідно з розрахунками [35], для імпульсного нагріву до таких температур бактерій *e-coli* необхідно отримувати пікову щільність потужності випромінювання на оброблюваній поверхні в повітрі (103 Вт/см<sup>2</sup>) і у воді (104 Вт/см<sup>2</sup>) (рис. 3.2). Як впливає з розрахунків [40], нагрів починає проявлятися вже при значеннях 102 Вт/см<sup>2</sup> в повітрі і 103 Вт/см<sup>2</sup> у воді, оскільки для

багатьох мікроорганізмів нагрів до температури  $70^{\circ}\text{C}$  є критичним. Перегрівання залежить від властивостей довкілля. Так для води потужності випромінювання мають бути вищі, оскільки теплопередача від мікроорганізму у воді вище, ніж в повітрі.

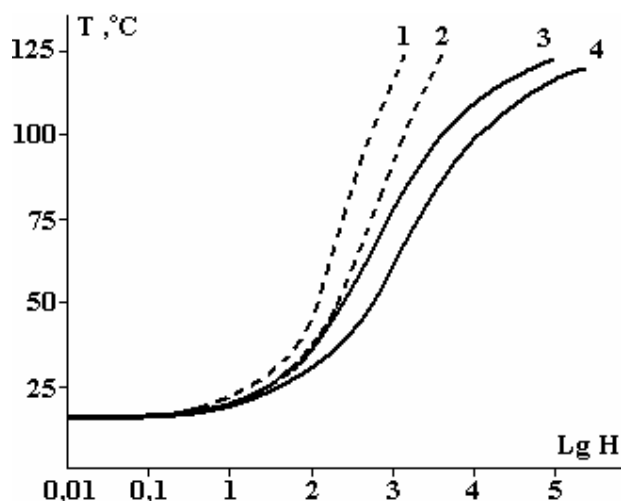


Рис. 3.2 Розраховані температури нагріву для бактерії E-coli в залежності від пікової щільності потужності ( $\text{Вт/см}^2$ ) УФ випромінювання в повітрі (1, 2) та в воді (3, 4) для двох імпульсів: 100 (1 і 3) і 1 мс (2 і 4) [34, 35]

Ще раз відмітимо, що основний вклад в нагрів мікроорганізмів дає УФ випромінювання, а не видиме світло або інфрачервоне випромінювання. Швидше за все це пов'язано з тим, що УФ випромінювання поглинається на меншій глибині, ніж видиме або інфрачервоне, а також з тим, що при розмірах мішені мікрон і менше на процеси розсіювання і поглинання фотонів робить вплив хвильова природа світла, довгохвильові фотони більше розсіюватимуться і минуть мікрочастинку, чим УФ фотони. Експериментально показано, що імпульсного перегрівання і руйнування мікроорганізмів можна досягти і при використанні тільки м'якого УФ випромінювання з областей А і В (280–400 нм), якщо його інтенсивність вища за порогову, що дозволяє забезпечити дезінфекцію без застосування жорсткого бактерицидного УФ випромінювання з області С (200–280 нм).

Окрім величини пікової потужності необхідно забезпечити підведення енергії до мішені, достатньої для нагріву. Якщо імпульс випромінювання дуже короткий, наприклад менше 1 мкс, то цього часу може не вистачити для нагріву мікроорганізму. Іншими словами, для реалізації механізму перегріву необхідно забезпечити і імпульсну потужність випромінювання, щоб підведення енергії було вище, ніж скидання тепла від мікроорганізму в довкілля, і поглинену дозу енергії для того, щоб її вистачило для нагріву мікроорганізму до високої температури. Оскільки дія цих температур короткочасна, їх може виявитися недостатньо для дезінфекції спор і деяких видів бактерій, так само як при звичайному нагріві необхідний певний час дії для руйнування усіх мікроорганізмів даного типу.

Основними чинниками, що визначають ефективність джерел УФ випромінювання, є: бактерицидна ефективність, бактерицидний потік лампи, ресурс, падіння бактерицидного потоку до кінця строку служби лампи, компактність і вартість блоку запуску і живлення (ПРА), безпечність і технологічність використання джерела бактерицидного випромінювання.

Застосування бактерицидних газорозрядних ламп, в яких основним випромінюючим елементом є атом ртуті, обумовлене тим, що він має резонансний електронний перехід з довжиною хвилі випромінювання 253,7 нм, що близько до максимуму кривої бактерицидної чутливості. У ртутних і амальгамних лампах низького тиску ККД перетворення вкладеної в лампу електричної енергії у випромінювання на довжині хвилі 253,7 нм досягає 35–50% [1, 3], що складає більше 90% всього УФ випромінювання. У цих джерелах тиск інертного газу складає 800–5000 Па, а тиск парів ртуті – 10–15 Па. Амальгамні лампи, завдяки більшим значенням потужності УФ випромінювання в порівнянні з ртутними лампами низького тиску дозволяють ефективно вирішувати завдання бактерицидної обробки повітря, води і поверхонь. Використання електронних компактних ПРА, що працюють на частоті 20–50 кГц, дозволило підвищити ККД системи лампа-ПРА, збільшити строк служби лампи до 16000 годин і варіювати електричну потужність лампи

в процесі її роботи. Високий бактерицидний ККД, зручність роботи з ПРА, ресурс більше 1000–16000 годин і відносна дешевизна привели до широкого використання ртутних і амальгамових ламп низького тиску.

Дуговий розряд при високому тиску парів ртуті  $10^3$ – $10^5$  Па має нижчий ККД в області бактерицидного УФ випромінювання – 15% з урахуванням кривої бактерійної ефективності це значення знижується до 10–11%. Практично усі бактерицидні ртутні лампи, що промислово випускаються, високого тиску випромінюють УФ випромінювання з довжиною хвилі менше 200 нм, що призводить до напрацювання високотоксичного озону. Ртутні лампи низького тиску виготовляють в основному з боросилікатного скла або спеціальних сортів кварцу, які не пропускають короткохвильове випромінювання і виключають напрацювання озону, що вигідно відрізняє їх від озonoутворюючих ламп.

Основною заявленою перевагою імпульсних ксенонових ламп є велика пікова потужність в імпульсі, яка досягає 5–50 МВт при тривалості імпульсу 1–200 мкс. Спочатку ксенонові лампи були розроблені для накачування твердотілих лазерів, а потім стали застосовуватися і для знезараження. Спектральний склад випромінювання залежить від щільності розрядного струму [34, 35] і схеми включення лампи. На діапазон довжин хвиль від 200 до 300 нм припадає 25–30 % всього випромінювання в діапазоні 100–1100 нм і 40% на увесь УФ діапазон. Відповідно бактерицидна ефективність складе 10–13% сумарного випромінювання лампи. На рисунку 3.1 приведена бактерицидна ефективність імпульсної ксенонової лампи. Отриманий результат узгоджується з даними для ксенонових ламп типу ИМП- 7/120 і ИФП- 8000 [1, 3]. З урахуванням втрат на пропускання колби лампи і теплових втрат бактерицидна ефективність складе  $\sim 10\%$  вкладаємої в лампу електричної енергії. Широкий спектр випромінювання імпульсних ксенонових ламп швидше недолік, ніж перевага, оскільки її короткохвильова частина може призводити до небажаного утворення озону, до побічних хімічних реакцій і напрацювання шкідливих для людини з'єднань. Для

зменшення інтенсивності випромінювання в короткохвильовій області спектру зменшують щільність струму в лампі (рис. 3.3), пікова потужність випромінювання при цьому теж зменшується. Також використовують додаткові захисні плівки або спеціальні сорти кварцу, проте це значно збільшує вартість ламп і зменшує ресурс із-за поглинання УФ випромінювання кварцовою колбою.

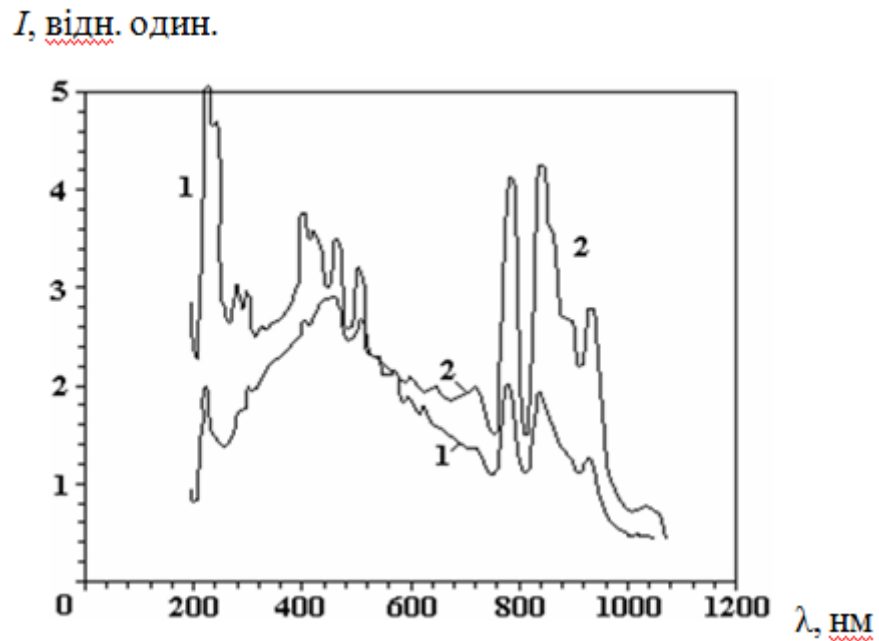


Рис. 3.3 Спектр випромінювання імпульсної ксенонової лампи при щільності струму 6,5 (1) і 1 кА/см<sup>2</sup> (2)

Строк служби імпульсних ксенонових ламп визначається числом спалахів, які може забезпечити лампа. Чим вище енергія імпульсу, тим менше число спрацьовувань лампи, яке варіюється від  $10^3$  до  $10^8$  імпульсів. Середня потужність лампи регулюється зміною частоти дотримання імпульсів. При частоті спалахів 30 Гц і ресурсі  $10^8$  імпульсів отримуємо час безперервної роботи лампи менше 1000 годин. При практичному застосуванні імпульсних ламп падіння потоку УФ випромінювання до кінця строку служби складає 25–50 %.

Для запалення імпульсних ксенонових ламп використовують дві основні електричні схеми, в яких в якості накопичувача енергії служать імпульсні

конденсатори. В одній схемі імпульсна лампа постійно підключена до конденсатора і до лампи постійно прикладена робоча висока напруга 1–5 кВ. Для отримання розряду на лампу від спеціальної схеми подається високовольтний імпульс амплітудою 10–30 кВ, який ініціює електричний пробій. У іншій схемі між накопичувальним конденсатором і лампою знаходиться високовольтний ключ, наприклад іскровий розрядник або тиратрон. Використання комутатора збільшує вартість імпульсного джерела живлення і зменшує його ресурс. Застосування потужної імпульсної високовольтної техніки значно збільшує габарити і складність джерела живлення для імпульсних ламп і пред'являє підвищені вимоги по безпеці при роботі з цим обладнанням.

Таким чином, імпульсні джерела УФ випромінювання характеризуються високою (до 50 МВт) піковою потужністю, бактерицидною ефективністю УФ випромінювання біля 10%, строком служби близько 1000 год. і громіздким високовольтним джерелом живлення. Лампи з високим питомим навантаженням, такі як ртутні лампи високого тиску і імпульсні ксенонові лампи, вимагають інтенсивного тепловідводу, що робить конструкцію устаткування на їх основі складнішою в порівнянні з устаткуванням на ртутних або амальгамних лампах низького тиску.

При імпульсній потужності в зоні знезараження нижче граничної ( $1\text{--}3 \text{ кВт/см}^2$ ) імпульсні джерела УФ випромінювання можуть бути використані аналогічно звичайним бактерицидним лампам. В цьому випадку бактерицидна дія залежить від долі УФ випромінювання бактерицидного діапазону, яка складає біля 25% усього імпульсу випромінювання [32, 34] і біля 40% УФ випромінювання усіх УФ діапазонів (А, В і С) [34]. Згідно з діючими методичними вказівками, бактерицидний ефект УФ випромінювання визначається не піковим значенням інтенсивності випромінювання, а інтегралом бактерицидної опроміненості за часом дії відповідно до приведеної формули 3.3. Відповідно бактерицидна ефективність і бактерицидний ККД перетворення енергії імпульсних ламп складає 10–13%

сумарного випромінювання лампи [32], що у декілька разів нижче, ніж у ртутних ламп низького тиску, і приблизно відповідає ртутним лампам високого тиску. Проте застосування імпульсних ламп може бути необхідним в спеціальних виробничих умовах де не допускається наявність ртуті, або для підвищення екологічної безпеки.

При знезараженні повітря в приміщенні за допомогою імпульсної лампи з низькою частотою спалахів можуть виникнути проблеми. Повітря в приміщеннях переміщується під дією вентиляції і конвекційних потоків з характерними швидкостями руху повітря не більше 0,1–0,2 м/с в приміщеннях з людьми для їх комфортного перебування. Випромінювання одного імпульсного джерела ефективно знезаражує повітря поряд з ним, проте внаслідок сильного зменшення інтенсивності випромінювання з відстанню робить малий ефект на віддалені області. Як наслідок – сумарний час обробки має бути досить великим для перемішування повітря в кімнаті і кількість імпульсів має бути великою, що зводить нанівець переваги потужного імпульсного джерела. Відмітимо, що ефективність знезараження повітря в приміщенні стаціонарними відкритими опромінювачами малої потужності доведена багаторічною практикою [1, 3, 5] і встановлені практично необхідні потужності безперервного УФ випромінювання для більшості використовуваних. При постійному опроміненні уся вода або повітря отримають деяку середню дозу УФ випромінювання.

Аналогічна ситуація при низькій частоті спалахів може реалізуватися і при знезараженні повітря або води в проточному режимі, наприклад в установках закритого типу, де опромінення робиться в повністю закритій камері, через яку проходить повітря або вода. Внаслідок досить малого часу перебування оброблюваного середовища в зоні опромінення необхідно забезпечити досить високу частоту спалахів для надійного знезараження повітря або води.

Отже, якщо щільність потужності УФ випромінювання менші за пікову, то єдина перевага імпульсного джерела – це можливість впродовж дуже

короткої, в порівнянні з ртутною лампою, проміжку часу зробити дезінфекцію, наприклад медичних матеріалів або упаковки [5, 41].

При щільності потужності УФ випромінювання вище пікового ( $1\text{--}3 \text{ кВт/см}^2$ ) і при достатній тривалості імпульсу з'являються додаткові можливості знезараження, оскільки працюватимуть обидва механізми, описаних вище. Імпульсну термічну дезінфекцію або стерилізацію можна проводити по відношенню до мікроорганізмів, стійких до бактерицидного УФ випромінювання. Окрім цього з'являється додаткова можливість стерилізувати харчові продукти, біологічні розчини, медичні матеріали, контактні лінзи або інші зразки тільки м'яким УФ випромінюванням в областях А і В [34, 35], якщо жорстке бактерицидне випромінювання в області С не використовується із-за ініціації небажаних хімічних реакцій або ушкодження зразка, наприклад медичних препаратів або харчових продуктів. Можна робити стерилізацію пакувального матеріалу і зразків всередині упаковки імпульсним УФ випромінюванням, що проходить через матеріал упаковки [35, 41, 42].

Проте при цьому способі в умовах, що відрізняються від експериментальних випробувань, можуть бути отримані незадовільні результати. Термічна дезінтеграція мікроорганізмів принципіально відрізняється від механізму дії бактерицидного УФ випромінювання на ДНК, тому ефективність знезараження, отриману дослідним шляхом на малих відстанях від імпульсного джерела, де інтенсивність вища за пікову, не можна екстраполювати і застосовувати на великих відстанях, оскільки інтенсивність УФ випромінювання на одиниці площі зменшується і механізм термічної деструкції перестає працювати. Необхідні потужності випромінювання будуть сильно занижені, а ефективність знезараження дуже завищена. Наприклад, нехай пікова потужність УФ випромінювання дорівнює  $5 \text{ МВт}$ , а довжина лампи –  $0,5 \text{ м}$ . Якщо тестові випробування проводити на відстані  $100 \text{ мм}$  від осі лампи, то, приймаючи для оцінки циліндричне джерело, отримаємо пікову щільність УФ випромінювання  $1\text{--}2 \text{ кВт/см}^2$ , що достатньо для початку



термічної деструкції мікроорганізмів в повітрі і на поверхні. На відстані 2 м джерело наближається до точкового, тому щільність випромінювання падає обернено пропорційно до квадрата відстані і складе не більше  $20\text{--}50 \text{ Вт/см}^2$ , що істотно нижче пікового значення, отже, термічна деструкція не працює. Якщо використовується відкритий опромінювач для знезараження повітря в приміщенні з відстанню між стінами 4 м, то для реалізації механізму перегріву імпульсна потужність УФ випромінювання повинна складати  $\sim 500 \text{ МВт}$ , що недосяжно для існуючих імпульсних ламп. Отже, реалізувати механізм перегріву в усьому об'ємі при знезараженні приміщень поодинокими відкритими імпульсними опромінювачами неможливо.

Роботи по знезараженню води і повітря шляхом деструкції мікроорганізмів при нагріві імпульсним випромінюванням знаходяться на стадії експериментальних досліджень, не розроблена нормативна база по їх застосуванню, немає рекомендації і методики конструювання і застосування промислових установок, не визначені мінімальні значення пікової щільності потужності випромінювання для дезінфекції різних видів мікроорганізмів і залежність цих значень від умов зовнішнього середовища і тривалості імпульсу випромінювання, не вибрані типи мікроорганізмів для надійної оцінки якості обладнання.

Для практичного застосування методу імпульсної термічної дезінфекції бактерій і спор потрібний набір експериментальних статистично достовірних даних про необхідні потоки потужності імпульсного випромінювання для дезінфекції кожного виду мікроорганізмів і їх залежності від довкілля, швидкості наростання імпульсу потужності випромінювання і тривалості дії імпульсу на мікроорганізм. Через нетривалість дії перегрівання його може виявитися недостатньо для дезінтеграції спор і деяких видів бактерій. Необхідно провести випробування по кожному виду мікроорганізму. Сьогодні така база даних існує тільки для безперервного УФ випромінювання на довжині хвилі 254 нм. Проводити пряму аналогію доз, необхідних для знезараження ртутними і імпульсними лампами, не можна, оскільки дози

імпульсного випромінювання можуть відрізнятися від дугових ртутних розрядів. Наприклад, з приведених в [43] даних видно, що для деяких мікроорганізмів необхідні дози імпульсного УФ випромінювання можуть бути як вище, так і нижче доз при безперервному УФ опроміненні. Метод термічної деструкції мікроорганізмів імпульсним УФ випромінюванням вимагає додаткових досліджень для визначення його можливостей на об'єктах з дуже малими розмірами 100-300 нм, таких як віруси, які співрозмірні з довжиною хвилі УФ випромінювання.

Енергетичні витрати при імпульсному методі знезараження води і повітря вищі, ніж при використанні ртутних ламп низького тиску. На практиці слід враховувати втрати в системах імпульсного живлення, наприклад у блоці живлення лампи L7684 японської фірми Hamamatsu втрати складають 50 % середньої потужності лампи. Ще одним істотним недоліком цього методу є дуже висока вартість устаткування [40]. При однаковому енергоспоживанні (2 кВт) устаткування для імпульсної стерилізації фірми «Мелитта» коштує 12000 євро, «Steribeam» - 88000 євро, а вартість устаткування з використанням амальгамних ламп низького тиску з тією ж споживаною потужністю не перевищує 1100 євро. Ресурс імпульсних ксенонових ламп, імпульсних конденсаторів і розрядників залежить від параметрів розряду і складає  $10^5$ – $10^8$  імпульсів або близько 100–1000 годин безперервної роботи, а для технологічних і практичних застосувань ресурс повинен складати 8000–10000 годин.

Устаткування з джерелами імпульсного УФ випромінювання доки не може конкурувати за енергетичними і фінансовими витратами з традиційними ртутними лампами низького тиску в системах знезараження води і повітря у великих об'ємах. Проте для бактерицидної обробки матеріалів і упаковки м'яким УФ випромінюванням, а також в системах, де не допускається використання приладів, що містять ртуть, ксенонові лампи є, мабуть, найбільш прийнятним варіантом.

Застосування потужної високовольтної імпульсної техніки значно

збільшує габарити і складність силового живлення для імпульсних ламп, пред'являє підвищені вимоги по безпеці, вимагає висококваліфікованого обслуговуючого персоналу, підвищує експлуатаційні витрати.

Для знезараження води і повітря шляхом деструкції мікроорганізмів при нагріві імпульсним випромінюванням не розроблена нормативна база по застосуванню і експлуатації промислових установок, не вибрані типи мікроорганізмів для надійної оцінки якості устаткування. Основні характеристики і можливості при бактерицидній обробці ртутними і імпульсними ксеноновими лампами приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

## Параметри ламп для бактерицидної обробки

Параметри	Ртутна лампа низького тиску	Ртутна лампа високого тиску	Амальгамна лампа	Імпульсна ксенонова лампа
Кількість металічної ртуті в лампі, мг	3-10	100-300 і більше	0,00003 в парах	—
ККД бактерицидного випромінювання (з врахуванням кривої бактерицидної ефективності), %	30-40	8-11	30-40	8-10
Ресурс ламп, тис. год	12-16	3-5	12-16	1 (при частоті 30 Гц)
Маса джерела живлення, кг	0,2	5-10	0,5	5-30
Вартість джерела живлення, євро	6-10	200-400	50-100	5000-10000
гарантійне знезараження повітря в	+	+	+	Частота імпульсів повинна бути достатньо високою.

приміщеннях або потоків води і повітря				При низькій частоті імпульсів деякі об'єми не отримують необхідної дози УФ випромінювання
Можливість використання механізму перегріву стерилізації	—	—	—	Дозволяє стерилізувати мікроорганізми, що стійкі до УФ випромінювання, стерилізувати розчини і предмети в середині упаковок
Напрацювання озону та інших побічних ефектів	—	+	—	+
Простота експлуатації	+	+	+	— потребує кваліфікованого персоналу
Безпечність експлуатації	+	— Напрацьовується озон	+	— Висока напруга (5-15 кВ) напрацьовується озон
експлуатаційні витрати	низькі	низькі	низькі	Високі
Наявність нормативної бази	+	+	+	—

+ так; — ні.

Таким чином, на основі проведених досліджень можемо зробити висновки, щодо використання імпульсних ультрафіолетових ламп:

1. Імпульсні ксенонові лампи у декілька разів програють по ефективності перетворення електроенергії в УФ випромінювання екологічно безпечним амальгамними лампами і можуть бути використані в спеціальних

умовах, коли не допускається наявність ртуті або для підвищення екологічної безпеки. Якщо потужність імпульсного УФ випромінювання менша за пікову, то єдина перевага – це можливість впродовж короткого проміжку часу зробити знезараження, наприклад медичних матеріалів або упаковки.

2. При потужності імпульсу УФ випромінювання вище пікового 1–3 кВт/см<sup>2</sup> працює ще один механізм стерилізації, коли в результаті перегрівання мікроорганізму при поглинанні УФ випромінювання в спектральних діапазонах А, В, С відбувається його термічне руйнування. Випромінювання у видимій та інфрачервоній областях спектру не вносить істотного вкладу в нагрів мікроорганізмів. Термічну стерилізацію при потужності вище пікового значення можна проводити на відстанях не більше 100–150 мм від лампи. Цей механізм дозволяє проводити: 1) стерилізацію по відношенню до мікроорганізмів, стійких до бактерицидного УФ випромінювання, наприклад плісняви; 2) знезараження і стерилізацію тільки м'яким УФ випромінюванням в областях А і В, якщо жорстке бактерицидне випромінювання в області С непридатне із-за ініціації небажаних хімічних реакцій або ушкодження зразка; 3) стерилізацію зразків всередині прозорої упаковки. Можна стерилізувати біологічні розчини, медичні матеріали, контактні лінзи або інші зразки, поверхні, харчові продукти, робити стерилізацію пакувального матеріалу і зразків усередині упаковки імпульсним УФ випромінюванням, що проходить через матеріал упаковки. На великих відстанях (~1 м) від лампи механізм перегріву не працює при існуючих потужностях лампи.

3. Не рекомендується застосовувати імпульсні джерела з низькою частотою для знезараження повітря в приміщеннях, а також потоків води або повітря, оскільки неможливо гарантовано забезпечити бактерицидну дозу в усьому об'ємі, що обробляється.

4. Роботи по знезараженню води і повітря шляхом деструкції мікроорганізмів при нагріві імпульсним випромінюванням знаходяться на стадії експериментальних досліджень, не розроблена нормативна база по їх застосуванню, рекомендації, а також методики конструювання і використання

промислових установок, не визначені мінімальні значення пікової щільності потужності випромінювання для дезінтеграції різних видів мікроорганізмів і залежність цих значень від умов зовнішнього середовища, не вибрані типи мікроорганізмів для надійної оцінки якості устаткування. Метод термічної деструкції імпульсним УФ випромінюванням не може бути рекомендований до широкого застосування до рішення цих питань.

5. Вартість устаткування на основі імпульсних ксенонових ламп на порядок більше, чим при використанні амальгамних ламп. Пристрої з імпульсними ксеноновими лампами мають більш високі енерговитрати, низький ресурс, високі експлуатаційні витрати, в них застосовується висока постійна напруга ( $\sim 5$  кВ) та імпульсна (до 30 кВ), високовольтні дроти створюють велику небезпеку. Для експлуатації і обслуговування імпульсних установок потрібно висококваліфікований обслуговуючий персонал.

## Висновки до розділу

1. Корисний строк служби УФ-ламп в діапазоні спектру УФ-С можна оцінювати по незавершених випробуваннях після 2500-3000 год. за результатами спаду променевого потоку з точністю до  $\pm 3$  %. Корисний строк служби (при зниженні променевого потоку до 70 % початкового) для досліджених ламп складає 8,3 тис. год.

2. Дезінфекція імпульсним випромінюванням залежить від пікової потужності і тривалості імпульсу УФ випромінювання. При потужності нижче пікового значення ( $1-3 \text{ кВт/см}^2$ ) знезараження здійснюється бактерицидним УФ випромінюванням, необхідна доза якого визначається інтеграцією імпульсу випромінювання за часом і по бактерицидному спектру.

3. Імпульсні ксенонові лампи у декілька разів програють по ефективності перетворення електроенергії в УФ випромінювання екологічно безпечним амальгамним лампам.

4. Вартість устаткування на основі імпульсних ксенонових ламп на порядок більше, чим при використанні амальгамних ламп. Пристрої з імпульсними ксеноновими лампами мають більш високі енерговитрати, низький ресурс, високі експлуатаційні витрати, в них застосовується висока постійна напруга ( $\sim 5 \text{ кВ}$ ) та імпульсна (до  $30 \text{ кВ}$ ), високовольтні дроти створюють велику небезпеку.

## **РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ УФ-ОПРОМІНЮВАННЯ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ**

Оптичне випромінювання широко використовується в агропромисловому комплексі для розробки нових технологій спрямованих на підвищення продуктивності рослинної продукції. Одним із напрямків використання оптичного випромінювання є передпосівна обробка насіння сільськогосподарських культур ультрафіолетовим випромінюванням [44, 45].

Дослідження впливу передпосівного опромінення насіння рослин ультрафіолетовим випромінюванням на їх зростання, продуктивність, зараження грибковими та іншими захворюваннями розпочато відносно не давно і ця проблема вивчена ще не досить ґрунтовно, тому дослідження в даному напрямку є актуальними.

### **4.1 Аналіз ролі УФ-випромінювання на розвиток і продуктивність різних культур**

Основним джерелом енергії для життя рослин на Землі є Сонце, тому можна припустити, що для найбільш повного задоволення всіх фізіологічних потреб рослин при використанні штучних джерел світла необхідно мати спектр випромінювання наближений до сонячного.

Оптимізація режимів опромінення базується на знаннях про вплив оптичного випромінювання на ріст і розвиток конкретних видів культур. Основний вплив світлового середовища на ріст і продуктивність культур обумовлений трьома її показниками: спектральним складом випромінювання, щільністю потоку випромінювання і розподілом щільності потоку в часі [46].

Спектральний склад випромінювання впливає на безліч фізіологічних процесів в рослинах і цій проблемі присвячена велика кількість досліджень [47-51]. Більшість з них відноситься до області фотосинтетично активної



радіації (ФАР) в діапазоні довжин хвиль 380-710 нм. Що стосується ультрафіолетового випромінювання УФ-області, далекої червоної та інфрачервоної (ІЧ) то їх роль для розвитку та продуктивності сільськогосподарських культур в закритому ґрунті досліджені на наш погляд недостатньо. Тому дана проблема на сьогодні є актуальною.

Ультрафіолетове випромінювання є частиною неіонізуючого електромагнітного спектра Сонця і становить приблизно 8-9% сонячної радіації, що досягає Землі [52, 53]. УФ традиційно поділяють на три діапазони: УФ-С (200-280 нм), який становить близько 1% спектра і є небезпечним для рослин, однак у звичайних умовах практично не досягає поверхні Землі; УФ-В (280-320 нм) - становить 1,5% сонячної радіації і як правило, погано впливає на ріст і розвиток рослин, проте, для нормального розвитку деяких видів рослин потрібна невелика кількість випромінювання в даному діапазоні; УФ-А (320-400 нм) - становить приблизно 6,3% сонячної радіації і є безпечним для живих організмів, грає регуляторну роль в розвитку рослин, тому є доцільним присутність невеликої кількості випромінювання в спектрі даного діапазону [47, 54].

Озоновий шар Землі повністю поглинає короткохвильове УФ-випромінювання з довжинами хвиль, меншими 280 нм. Коефіцієнт абсорбції озоном УФ випромінювання швидко зменшується при збільшенні довжини хвилі більше 280 нм і дорівнює нулю при 330 нм. Фактично поверхні Землі досягає лише випромінювання з довжинами хвиль, що перевищують 290 нм.

Вивчення впливу УФ-випромінювання на рослини відбувалося протягом більшої частини ХХ століття. Слід, зокрема, згадати роботу Калдвелла [52], який, узагальнивши досвід попередників і власні експерименти, сформулював методичні підходи, що дозволяють порівнювати біологічну ефективність різних довжин хвиль сонячного і отриманого від штучних джерел УФ-В випромінювання. Особливо інтенсивно дослідження впливу УФ-В на біологічні об'єкти почали проводитися з 80-х років, коли над

антарктичними областями були виявлені так звані «озонові діри». Відомо, що зменшення озонowego шару на 1% призводить до збільшення УФ-В випромінювання, яке досягає поверхні Землі на 1,3%.

До теперішнього часу накопичений значний експериментальний матеріал про біологічний вплив, що здійснює УФ-випромінювання (УФВ) на природні фітоценози та сільськогосподарські культури. З 1950-х років проводилися дослідження впливу УФВ на природну рослинність в умовах високогір'я, що відрізняється від рівнинної місцевості підвищеними рівнями УФ-радіації. Результати спостережень, що стосуються впливу УФ-В-радіації, а також спільної дії УФВ, природних кліматичних і техногенних факторів на рослини, узагальнені і опубліковані в ряді оглядових статей [50, 51, 53, 55, 56]. Так, в роботі [56] обговорюються питання застосування УФ-випромінювання для передпосівної обробки і стимуляції розвитку вегетуючих рослин. Аналіз опублікованих даних демонструє різні методичні підходи при експериментальній оцінці біологічної дії ультрафіолетового випромінювання на природну рослинність і сільськогосподарські культури. У зв'язку з цим, провести порівняльну оцінку отриманих результатів часто буває важко.

В [46, 47] обґрунтовано необхідність перегляду частини даних, які отримані раніше, щодо біологічного впливу УФ-випромінювання на рослини і більш суворої постановки подальших експериментальних досліджень з використанням лампових систем, що моделюють УФ вплив на сільськогосподарські культури.

Розвиток рослин протягом усього життєвого циклу регулюють фоторецептори. Всі складні і різноманітні відповіді на світло медіують лише невеликою кількістю типів фоторецепторів (рис. 4.1). Вони сприймають світлові сигнали і ініціюють внутрішньоклітинні сигнальні шляхи, що включають протеолітичне розщеплення сигнальних компонентів і репрограмування транскрипції. Механізми передачі світлового сигналу фоторецепторами в деталях невідомі. З'ясування ролі окремих фоторецепторів в розвитку рослин представляє значні труднощі, у зв'язку з тим, що деякі

фоторецептори володіють синергічною дією, в той час як інші є антагоністами. Сукупність наявних даних свідчить про різноманітність і специфічність фоторецепторів у рослин [57].

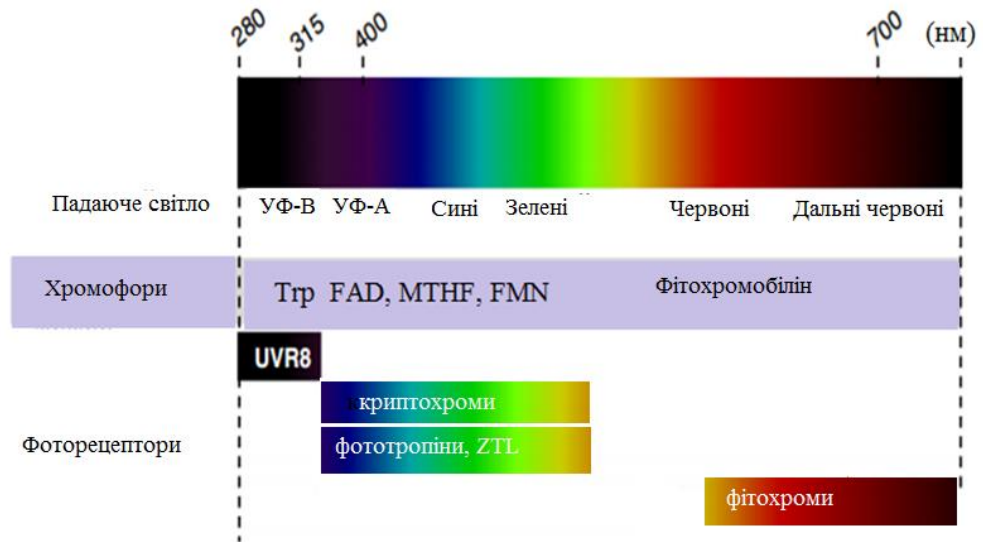


Рис. 4.1 Класифікація та оптичні властивості регуляторних фоторецепторів [58]

Фотоморфогенетичний вплив світла на рослину реалізується через регуляторні фоторецептори, які складаються з пігменту, що поглинає світло (хромофора), пов'язаного з молекулою білка-ефектора (апопротеїну).

Поглинання світла хромофором стимулює хімічні або конформаційні зміни в апопротеїні рецептора, які передаються сигнальним молекулам [59]. Кожен тип фоторецепторів містить хромофорні групи, що визначають його оптичні властивості.

Рослини здатні розрізняти майже всі характеристики світла, включаючи напрямок, довжину хвилі і тривалість освітлення, використовуючи при цьому три основні класи фоторецепторів, «впізнають» різні довжини хвиль. Синє світло/УФ-А поглинають кріптохроми і фототропіни-кріптохроми (CRY1, CRY2 і CRY3), фототропіни (PHOT1 і PHOT2) і ZTL. Функціонально взаємопов'язані, ці фоторецептори запускають програми розвитку рослин і координують циркадні ритми їх біологічних процесів з добовим сонячним

циклом [60].

Кріптохроми поглинають світло в області від синьої до УФ-А радіації, беруть участь в регуляції деетіоляції, в налаштуванні циркадних ритмів і індукції цвітіння [61-66]. У багатьох випадках кріптохроми працюють спільно з цитохромами [61, 67].

У кріптохромах хромофорними групами служать флавін і птерін (або діазофлавін). Світлозбиральним хромофором є птерін. Білки кріптохромів споріднені ДНК-фотоліазам - ферментам, які беруть участь у відновленні ушкоджень ДНК викликаних короткохвильовим УФ-випромінюванням. Хоча кріптохроми не можуть безпосередньо відновлювати ДНК, первинні акти захоплення світла у них такі ж, як у фотоліаз. Кріптохромна фоторецепторна система локалізована в ядрі. Припускають наявність світлозалежного транспорту кріптохром через ядерну мембрану. Кріптохроми контролюють біосинтез антоціанів і каротиноїдів. Від кріптохромного сигналу залежить експресія генів халконсінтази, халконізомерази, дігідрофлавонолредуктази і інших ферментів біосинтезу антоціанів. Кріптохромний сигнал гальмує зростання гіпокотилля на світлі, контролює процеси деетіоляції і продишної провідності [68]. У *Arabidopsis* ідентифіковані 4 основних фоторецептори синього світла: два кріптохроми (Cry1 і Cry2) і 2 фототропіни (Phot1 і Phot2). Кріптохром 1 (Cry1) - основний рецептор синього / УФ-А світла, бере участь в фотоморфогенезі і грає вирішальну роль у відповідних реакціях *Arabidopsis* на світло високої інтенсивності, що веде до окислювального пошкодження.

Центральне місце в кріптохромному сигналінгу займає світлозалежне розщеплення конститутивного білка, що бере участь в фотоморфогенезі (constitutive photomorphogenic 1, COP1). Фоторецептор Cry2 функціонує, в основному, при низьких інтенсивностях синього світла. На відміну від Cry1, Cry2 швидко руйнується під дією УФ-А, синього і зеленого світла. При опроміненні синім світлом низької інтенсивності цей рецептор інгібує елонгацію гіпокотилля. Обидва кріптохрома - Cry1 і Cry2 - є основними регуляторами ранніх генів індукованих синім світлом [69].

Кріптохроми також діють на циркадні ритми [70]. Фототропіни і кріптохроми чутливі так само до UVA і синього випромінювання [71], але є деякі докази того, що кріптохроми також можуть частково інактивуватися зеленим світлом [72, 73].

На відміну від кріптохромів, фототропіни відіграють допоміжну роль в регуляції транскрипції чутливих до синього світла генів. Тільки обмежене число генів знаходиться під їх контролем.

Фототропіни поглинають в області від синього до УФ-А випромінювання [74], відповідають за рух хлоропластів і відкривання продихів фототропізми, беруть участь в ряді процесів, які оптимізують інтенсивність фотосинтезу і стимулюють зростання [75]. При поглинанні кванта синього / УФ-А випромінювання молекулою фототропіна відбувається утворення ковалентної зшивки між хромофором та апопротеїном фоторецептора, що призводить до зміни конформації молекули і запуску сигнального каскаду [76-78]. При цьому, частина фототропінів звільняється від зв'язку з мембраною і виходить в цитозоль, взаємодіючи з білками-посередниками передачі сигналу [79].

Фототропіни Phot1 і Phot2 - мембранні рецептори синього світла. У паростках *Arabidopsis* обидва фототропіни контролюють фототропізм. Phot1 і Phot2 володіють різною фотосенсорною чутливістю до синього світла. Це призводить до оптимізації фотосинтезу, що сприяє росту рослин в умовах низької освітленості [69]. Phot1 (мол. маса 120 кДа), який є протеїнкіназою, функціонує при різних інтенсивностях синього світла, в той час як Phot2 функціонує тільки при опроміненні інтенсивним синім світлом. Цей рецептор грає основну роль в хлоропластній реакції уникнення інтенсивного світла і разом з Cry1 захищає рослини від надмірного освітлення [68]. Припускають, що в мембрані фототропіни утворюють гетеродімер і порушення функціонування одного з фототропінів призводить до порушення фототропізму.

Додатково до трьох основних фоторецепторів (фітохроми, кріптохроми

і фототропіни) недавно виявлені фоторецептори синього світла: ZTL (Zeitlupe), FKF1 (FLAVIN-BINDING, KELCH REPEAT, F-BOX) і LKP2 (LOV KELCH PROTEIN 2). Припускають, що сімейство білків ZTL/FKF1/LKP2 бере участь в регуляції добових ритмів і фотоперіодичності цвітіння, контролюючи залежну від синього світла деградацію білків [80].

Сімейство протеїнів ZTL / ADO, що містять LOV-домен (чутливий до синього світла і УФ-А), відповідають за спрямовану деградацію компонентів, пов'язаних з циркадними ритмами і цвітінням [64]. Адитивність і синергізм різних реакцій рослин на світло, а також різні взаємодії між фоторецепторами забезпечують не тільки високу чутливість рослин до світлових сигналів середовища і їх змін, а також компенсацію функцій одних фоторецепторів іншими [58, 81, 82] і складну, не завжди передбачувану реакцію рослинного організму на варіювання параметрами освітлення [83].

Припускають, що сімейство білків ZTL / FKF1 / LKP2 бере участь в регуляції добових ритмів і фотоперіодичності цвітіння, контролюючи залежну від синього світла деградацію білків [80, 84].

Для поглинання світла в УФ-А/синьої частині спектру CRY1-3 використовують метенілтетрагідрофолат (MTHF) і флавінаденінді- нуклеотид (FAD), PHOT1-2 і білки сімейства ZTL як хромофор використовують флавінмононуклеотид (FMN).

Фоторецептор в області УФ-В (280-320 нм) - це ядерний білок UVR8 (UV RESISTANCE LOCUS 8) [85] – один із останніх з відкритих фоторецепторів рослин. Існування фоторецепторів, які поглинають в області УФ-В і в зеленій частині спектру електромагнітного випромінювання було передбачене в [86]. Це відкриття стало початком для подальшого дослідження УФ-В- сигналізу в рослинах [58].

UVR8 (фоторецептор УФ-В) має пік поглинання в області 280-300 нм [87]. При поглинанні кванта світла неактивний димер переходить в активний мономер і через регуляцію експресії генів запускає як загальні процеси фотоморфогенезу (наприклад, розгортання сім'ядолей), так і важливі

механізми захисту від ультрафіолетового опромінення і репарацію ушкоджень, що викликані ультрафіолетом (активація експресії генів фотоліаз в світлозалежних відновлюючих пошкодженнях ДНК, що викликані УФ опроміненням) [58].

Фоторецептор UVR8 реагує на УФ-світло з піком чутливості при  $\sim 290$  нм [88]. Рецептори УФ, в цілому, є порівняно новим класом фоторецепторів. Так, (UltraViolet Resistance Locus 8) був відкритий на початку 2000-х рр. [89]. UVR8 відповідальний за рецепцію ультрафіолету в області 280- 315 нм. Роль хромофора грає один з 7 залишків триптофану - Trp285 [90]. У відповідь на дію ультрафіолету змінюється конформація залишку Trp285, а разом з нею змінюється і конформація всього білка таким чином, що з гомодимеру утворюється дві мономерних молекули [91].

Гомодимер UVR8 мономеризується під дією УФ-В радіації, поглинутої хромофором на основі триптофану. Важливу роль у функціональній активності фоторецептора УФ-В грає взаємодія його з білком COP1. Утворений мономер UVR8, взаємодіючи безпосередньо з COP1, починає передачу сигналу УФ-В. Мономер UVR8 редимеризується через взаємодію з RUP1 і RUP2. При цьому руйнується комплекс UVR8-COP1, що інактивує шлях передачі сигналів, і відновлюється гомодимер UVR8, здатний до повторного сприйняття УФ-В (рис. 4.2). Поглинувши ультрафіолетове випромінювання (УФ-В), гомодимер UVR8 дисоціює в мономери. Потім мономер UVR8 асоціюється з COP1, що в кінцевому підсумку призводить до активації генів, чутливих до ультрафіолетового випромінювання.

Фізіологічна роль UVR8 пов'язана зі зміною експресії генів, акліматизацією і стійкістю до УФ-В, гальмуванні зростання гіпокотилля.

Як відомо, тетрагідрооптерини не флуоресціюють, і, отже, не можуть передавати світловий сигнал шляхом диполь-дипольного перенесення енергії по Ферстеровському механізму. Тетрагідрооптерини, скоріш за все, не утворюють триплетні форми і збуджені стани з тривалим часом життя. Можна припустити, що передача світлового сигналу відбувається в результаті зміни

конформації молекули, у відповідь на яку, ймовірно, відбуваються структурні зміни і в апобілку УФ-В-рецептора. Наприклад, як в білку UVR8 [92].

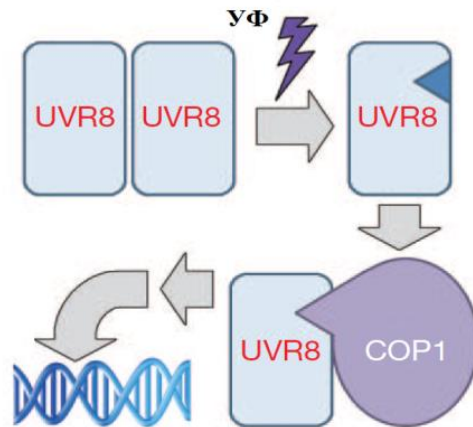


Рис. 4.2 Схематична діаграма ультрафіолетового зондування білка UVR8 [87]

У присутності УФ-В випромінювання рослини виробляють ряд пігментів і інших вторинних метаболітів, які виступають в якості сонцезахисних засобів для забезпечення захисту від пошкодження ультрафіолетовим випромінюванням [93]. Зокрема, утворення флавоноїдів і антоціанів зростає після впливу УФ-В [94, 95] і візуальне сприйняття насиченості забарвлення листя і квітів посилюється [96]. Рослини також зберігають компакту форму з впливом УФ-світла [97], і формують більш жорсткі і більш міцні листя [98]. Вплив УФ-В випромінювання збільшує також концентрацію ефірних масел в травах.

Вплив ультрафіолетової радіації на рослини в діапазоні 280-320 нм охоплює всі рівні біоорганізації [99], а також сигнальну, регуляторну та енергетичну функції [100].

Чутливість вищих рослин до сонячного ультрафіолетового випромінювання істотно залежить від гено- і екотіпу, етапу онтогенезу. Так, із 300 досліджуваних генотипів рослин близько 66% виявилися чутливими, 25% - середнє чутливими і тільки 9% - нечутливими до УФ-В радіації [101]. Стійкість до впливу УФ-В випромінювання в посушливих умовах зростання може зазнати впливу відбору і посилюватися в наступних поколіннях рослин



[102]. У видів, що проростають в умовах підвищеного фону УФ-В радіації - тропічних широтах і альпійському поясі - зі зростанням рівня ультрафіолету зростає і толерантність до його впливу [103].

Одне з найбільш вагомих наслідків підвищення рівня УФ-В опромінення - це пошкодження репродуктивної функції рослин. Генеративні тканини репродуктивних органів - археспоріальна і спорогенна тканини пиляків і сім'ябруньок, чоловічий і жіночий гаметофіт - надійно захищені покривами з УФ-В поглинаючими властивостями, зокрема, оцвітиною, тканинами пильовика і маточки [104]. За деякими даними, стінка пильовика поглинає до 98% ультрафіолетового випромінювання. Разом з тим, відомо, що додаткове опромінення УФ-В може пригнічувати ріст і розвиток рослин, надавати генотоксичні ефекти на меристему, впливати на запилення, знижувати кількість виробленого пилку і насіннєву продуктивність рослин [105].

Опромінення проростків рослин ячменю ультрафіолетом УФ-В впливає на ріст і розвиток статевих елементів колоса: прискорює диференціацію спорогенних тканин пильовика і чоловічого гаметофіту, яка супроводжується зростанням асинхронності мікрогаметогенезу, гетерогенності пилкових зерен і збільшенням стерильності пилкових зерен [106]. Високі дози ультрафіолету сприяють зниженню рівня стерильності пилку завдяки інтенсифікації гаплонтного клітинного відбору. Вплив ультрафіолету на репродуктивну систему рослини виражається в генотоксичних (через пошкодження ДНК клітин меристеми) і фотоіндукуючих діях (через прискорення цвітання і диференціації гаметофітом).

Основною мішенню впливу ультрафіолету є, як відомо, пилкові зерна вітрозапилюваних рослин. У багатьох видів покритонасінних додаткове УФ-В опромінення викликає редукцію довжини пилкових трубок, а у чутливих генотипів навіть слабкі потоки УФ-В ( $50-70 \text{ мВт/м}^2$ ) можуть пригнічувати проростання пилку.

Ультрафіолетове опромінення проростків ячменю індукує зростання

числа хромосомних аберацій в вегетативній та генеративній меристемах [107]. Динаміка утворення хромосомних аберацій в кореневій меристемі проявляла зворотну залежність від дози опромінення. У діапазоні малих доз ультрафіолету індуковані пошкодження зберігалися протягом всього онтогенезу рослин. При збільшенні дози опромінення активізувалися цитолітичні процеси в передмейотичній інтерфазі і ранньому мейозі, що призводило до зменшення кількості патологій в гаметогенезі. При максимальній експозиції ультрафіолету фертильність пилкових зерен відновлювалася. Отримані дані підтверджують ідею про позитивну роль клітинного відбору в механізмах відновлення і адаптації рослин до мутагенних чинників. Клітинна конкуренція в умовах опромінення обмежує мутагенез, регулює стан і чисельність клітинних популяцій і сприяє відновленню фертильності рослин.

УФ-В радіація, потік якої постійно збільшується внаслідок виснаження озонового шару в атмосфері, пошкоджує ДНК, білки, мембранні структури клітин і здійснює мутагенну дію на живі організми. В процесі еволюції у рослин розвинулися системи сприйняття УФ-В і ефективні захисні механізми. В [108] розглянуті об'єкти, які є молекулярними мішенями для УФ-В радіації, цитофізіологічної реакції рослин на опромінення, його вплив на продуктивність сільськогосподарських культур. Обговорюються шляхи трансдукції сигналу, індукованого УФ-В опроміненням в рослинних клітинах, вплив УФ-В на мікроорганізми і їх взаємодію з рослинами.

В роботі [109] експериментально визначена мінімальна сумарна середньоденна енергетична експозиція УФ-випромінювання сонця, складова складає 99-160 Дж/см<sup>2</sup> (в залежності від культури), необхідна для підвищення продуктивності рослин під флуоресцентними плівками.

#### **4.1.1 Вплив УФ-В радіації на рослини**

Однією з найбільш чутливих мішеней УФ-радіації є ДНК. УФ-радіація поглинається ДНК з максимумом близько 260 нм (УФ-С). В УФ-В-області

спостерігається істотне зниження поглинання, мале поглинання відбувається при 320 нм. У опромінених клітинах виникає значна кількість фотопродуктів [110], які можуть призводити до утворення мутацій в процесі подальшої реплікації. Виникає кілька типів мутацій, включаючи транзиції і трансверсії. Можуть утворюватися також розриви ниток ДНК і зшивання ДНК з білками [111]. Утворення димерів відбувається ще при 365 нм, при більшій довжині хвиль їх не виявлено [112]. Короткохвильове УФ-випромінювання високої інтенсивності призводить до передчасного старіння листя [113].

Ступінь радіаційного пошкодження ДНК визначається рівнем оксигенації клітин, системою антиоксидантного захисту, станом компактизації хроматину і швидкістю репарації. Аналогічним чином діє опромінення УФ-В спектру (320-280 нм). Воно збуджує електронні оболонки атомів, викликає в нуклеїнових кислотах різноманітні хімічні реакції, які призводять до мутацій [114]. Серед них найбільше значення мають гідратація цитозину і утворення циклобутанових димерів піримідинових основ. Полімерази не зчитують інформацію з ланцюга ДНК, що містить димер, що веде до блокування транскрипції генів і реплікації ДНК. Подібні пошкодження клітинного апарату закінчуються загибеллю клітин [115].

Утворення димерів лежить в основі всіх порушень життєдіяльності рослин. Це головний мутагенний ефект УФ-В опромінення. Крім того, фотоінактивація білків в результаті поглинання ультрафіолету триптофаном, веде до фотохімічних порушень регуляторних, ферментативних, транспортних функцій білків, без чого неможливі нормальні біологічні процеси в рослинному організмі [116]. Ще однією особливістю дії ультрафіолетового світла на ДНК є поява зшивок ДНК-білок. Зшивки з віком накопичуються і перешкоджають нормальній функції макромолекул. Утворення комплексів ДНК-білок спостерігається як в умовах короткохвильового опромінення, так і в умовах природного старіння. Дисбаланс в системі фотосинтетичного апарату рослини виникає при впливі високих потоків УФ-В радіації. На стадії старіння рослини засвоєння

поглиненої енергії світла менш ефективні, що збільшує фотопошкодження фотосинтетичного апарату. Захисними механізмами виступають ферментативні і неферментативні системи дезактивації активних форм кисню, які грають ключову роль в запобіганні фотопошкоджень окисного характеру [117].

Старіння і експресія генів групи SAG підвищуються в листях *Arabidopsis* під впливом УФ-В. У відповідь на короткохвильове випромінювання клас сигнальних молекул ROS (reactive oxygen species), що беруть участь в регуляції розвитку і стресових реакціях, активують експресію генів SAG, викликають прискорене старіння листя [118]. Аналогічне старіння викликає обробка листя інгібіторами каталази [119].

#### **4.1.2 Застосування УФ-опромінення в боротьбі з хворобами рослин**

Підвищені рівні УФ-В опромінення ускладнюють деякі хвороби рослин. У рослин цукрових буряків, заражених і, які отримували  $6,9 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$  УФ-В, виявляли значне зниження вмісту хлорофілу в листках, а також сирої і сухої ваги загальної біомаси. В іншому дослідженні три сорти огірків отримували щоденну дозу УФ-В опромінення величиною  $11,6 \text{ кДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$  УФ-В в теплиці до і/або після зараження і аналізувалися з точки зору розвитку хвороби [120]. Два з трьох сортів виявилися більш стійкими до хвороби, а третій - сприйнятливим. Передінфекційна обробка УФ-В опроміненням приводила до більш інтенсивного розвитку хвороби у сприйнятливого сорту і одного з стійких до хвороби сортів. Постінфекційна обробка не міняла розвитку хвороби. Посилений розвиток хвороби в УФ-В опроміненних рослинах було виявлено тільки на сім'ядолях, але не на справжніх листках, вказуючи, що вплив УФ-В випромінювання на розвиток хвороби в огірку коливається в залежності від сорту, періоду УФ-В опромінення і віку тканини.

Дослідження в вегетаційних камерах з озоновим фільтром для ослаблення УФ-В випромінювання сонця показали істотне зменшення

чистого фотосинтезу на поверхні листя і в усій рослині у саджанців соняшнику [110].

Стрес від високої інтенсивності УФ-опромінення впливає на фенілпропаноїдний і флавоноїдний шляхи у рослин, викликаючи індукцію і наступну акумуляцію УФ-абсорбуючих флавоноїдів. Вважається, що флавоноїди синтезуються як захисні пігментні агенти в рослинах [121].

Стресові навантаження часто призводять до виникнення флавоноїдної мутації, яка ідентифікована у багатьох рослин [122, 123].

В умовах світлового стресу, коли надлишково поглинена світлова енергія не може бути використана в фотохімічних реакціях, відбувається фотоінгібування. Процес супроводжується фотоокисленням пігментів, деструкцією каротиноїдів, знебарвленням хлорофілів і руйнуванням структур хлоропластів [57]. Інтенсивне світло викликає у рослин значні зміни в експресії багатьох генів, локалізованих в різних компартментах клітини [124]. Клітини справляються з високою інтенсивністю світла індукцією або репресією генів. Так, встановлено, що світло високої інтенсивності індукує експресію генів білків - близько 100 генів в геномі активуються в умовах світлового стресу, значна частина яких (70%) активується також посухою. Світло високої інтенсивності індукує експресію низки транскрипційних факторів, в той же час, в цих умовах експресія багатьох генів, пов'язаних з біосинтезом пігментів, пригнічується [9]. Механізми, за допомогою яких сприймається надмірне освітлення, а також, яким чином інформація передається в ядро, щоб ініціювати генетично детерміновану реакцію, невідомі. Встановлено, що з експресією генів фотосинтезу, локалізованих в геномах хлоропластів та ядра, корелюють редокс-стан пула пластохинонів [125].

## **4.2 Вплив передпосадкового УФ-опромінення на розвиток і продуктивність картоплі**

Великий інтерес викликає застосування УФ-опромінення для стимулювання зростання та підвищення стійкості рослин до зовнішніх чинників і збільшення врожайності сільськогосподарських культур.

Незважаючи на короткий період дослідження передпосівної обробки насіння оптичним випромінюванням уже опубліковано достатньо значну кількість праць [126-134].

Обробка передпосівного матеріалу бактерицидним УФ-випромінюванням в області С не тільки збільшує енергію проростання та схожість насіння [44, 128, 135], а й знезаражує його [133].

Так в роботі [128] відзначається позитивний вплив передпосівної обробки насіння УФ-випромінюванням: підвищується енергія проростання та польова схожість насіння, що забезпечує стійкі врожаї декоративних культур. В роботі [135] показано, що опромінення УФ-С насіння пшениці стимулювало його проростання. Авторами [44] проведені лабораторні дослідження схожості насіння пшениці після обробки ультрафіолетовим випромінюванням із різним спектральним складом. В якості джерела випромінювання використовували ксенонові лампи при наступних значеннях дози опромінення: 24; 48; 72; 96; 120 Дж/м<sup>2</sup>. Після обробки УФ-випромінюванням зростає енергія проростання і польова схожість насіння [44], а також підвищується врожайність [45, 126, 136, 137] і стресостійкість [126, 138], оскільки відбувається вплив на рівень пероксидази [139].

В Інституті лісу НАН Білорусії (м. Гомель) розроблена система передпосівної обробки УФ-випромінюванням сільськогосподарського і лісового насіння. Стверджується, що передпосівна обробка насіння стимулює фізіологічну активність зародка, підвищуючи його енергію, і не спричиняє негативної дії на спадкову систему. У опроміненого насіння енергія проростання збільшується на 20-30 %, а схожість - на 15-25 % порівняно з неопроміненим.

В роботі [133] автори досліджували вплив бактерицидної дії УФ-випромінювання на інгібування парші клубнів картоплі. При УФ-опроміненні дозами 10-15 кДж/м<sup>2</sup> інгібування розповсюдження хвороби знизилось на 25-28 %, а ступінь розвитку на 56-62%.

Вплив УФ-випромінювання на картоплю було досліджено співробітниками Всеросійського науково-дослідного інституту сільськогосподарської радіології та агроєкології (м. Обнінськ) в насінницькому картопляному господарстві ТОВ «Клон-Агро» Жуковського району Калузької області [126]. Проводили УФ-опромінення клубнів картоплі різних сортів перед посадкою і закладанням на зимове зберігання. Результати польових випробувань УФ-установки і технології опромінення показали, що прибавка врожаю за всіма вивченими сортами (11 сортів) склала від 10 до 40 %. При цьому відбувається зниження зараження клубнів грибковими захворюваннями.

В роботі [140] проведені експериментальні дослідження впливу УФ-опромінення середньоранніх сортів картоплі «Утро ранее» та «Рокко» ультрафіолетовим випромінюванням діапазону С. При дослідженнях використовували ультрафіолетові ртутні розрядні лампи низького тиску [141, 142]. Характеристики ламп представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Характеристики лампи кварцового скла  
Jiangyin Feiyang Instrument Co., Ltd.

Тип лампи	Потужність Р, Вт	Струм I, мА	Напруга на лампи U, В	УФ-опроміненість на відстані 1 м, Вт/см <sup>2</sup>
ZW23D15W(Y)-436	23	420	40-55	62-69

Схема установки для передпосівного опромінення клубнів картоплі наведена на рисунку 4.3.

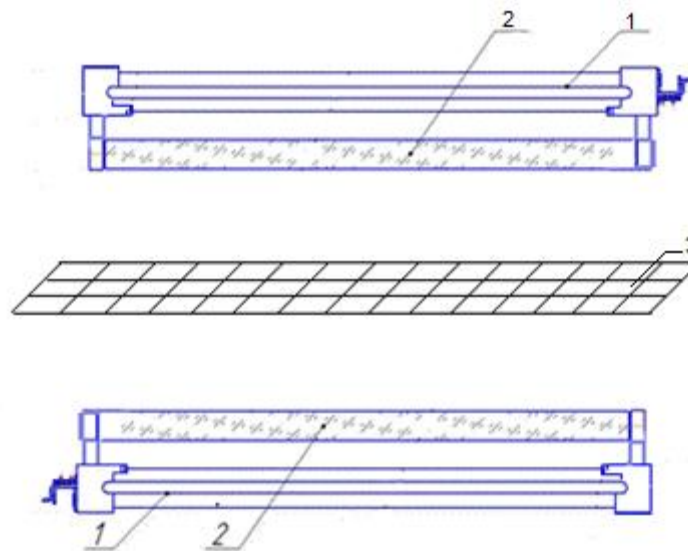


Рис. 4.3 Конструкція установки для УФ-опромінювання клубнів картоплі: 1 – корпус опромінювача; 2 – УФ лампа; 3 – решітка

Картопля в один шар укладається на решітку (3). Знизу і зверху на відстані 0,5 м встановлені УФ-опромінювачі. Часом опромінення та відстанню до УФ-джерел можна створити необхідну дозу опромінення.

Проведені експериментальні дослідження повинні були дати можливість перевірити відтворення результатів [126].

Експериментальними дослідженнями встановлено, що у рослин з опроміненими клубнями прискорено утворювалися і розвивалися первинні коріння. Відлік часу аналізу ефектів, що проявляються під дією УФР, було визначено 7 діб, оскільки у клубнів без будь-яких обробок первинні коріння починають з'являтися саме до цього періоду часу. При опроміненні клубнів картоплі сорту «Утро раннее» дозою  $120 \text{ Дж/м}^2$  (схема 1) середня довжина їх коренів була на 65 % більше, ніж в контрольному варіанті, а при опроміненні дозою  $240 \text{ Дж/м}^2$  (схема 2) - на 82%. Подібна динаміка спостерігалася і у сорту «Рокко» (таблиця 4.2).

Представлені експериментальні дані свідчать про те, що УФ-опромінення клубнів картоплі перед садінням сортів «Утро раннее» та «Рокко» дозами 120 і  $240 \text{ Дж/м}^2$  стимулює процеси ризогенезу, що підтверджено отриманими результатами в роботі [143].



Таблиця 4.2

Вплив дози ультрафіолетового випромінювання на процеси ризогенезу картоплі сортів «Утро раннее» та «Рокко»

Сорт картоплі	Доза опромінення, Дж/м <sup>2</sup>	Середня довжина коренів, після опромінення, мм	
		3 доби	7 діб
Утро раннее	Контрольний зразок	0	8,0±1,0
	120 (схема 1)	4	13,2±2,0
	240 (схема 2)	6	14,6±2,0
Рокко	Контрольний зразок	0	5,0±1,0
	120 (схема 1)	3	8,5±2,0
	240 (схема 2)	4	9,3±2,0

При опроміненні клубнів картоплі за схемою 2, тобто при поступовому накопиченні дози опромінення, помітних змін не зафіксовано в порівнянні із опроміненими клубнями за схемою 1. Відмінності контрольних і опромінених зразків по динаміці висоти рослин у вивчених сортів були різними (таблиці 4.3 та 4.4).

Подальшими спостереженнями встановлено, що відмінності між контрольними рослинами з опроміненими ставали більш явними в процесі їх росту. Так данні таблиць 4.3 та 4.4 свідчать про різницю в довжині рослин. Різниця між контрольними зразками і рослинами з опроміненими клубнями через 20 діб складала 27,3÷29,0 %, а через 45 діб – 21,2÷25,4 %. Висота досліджених зразків за схемою 1 та схемою 2 в процесі росту залишалася однаковою, істотної зовнішньої різниці не виявлено (таблиця 4.3 та 4.4).

Також слід зазначити, що вегетаційний період рослин з опроміненими клубнями картоплі пройшов на 12-14 днів раніше в порівнянні з контрольними зразками. Після збору врожаю середня маса клубнів картоплі була більшою в

опромінених зразках в порівнянні з контрольним варіантом, при цьому їх кількість також була більшою. Це має суттєве значення в первинному насінництві картоплі. Збільшення врожаю при УФ-опроміненні клубнів картоплі перед садінням склало в 2016 року – 15 %, а в 2017 року – 12%.

Таблиця 4.3

Динаміка висоти рослин при передпосадковим УФ-опроміненні клубнів картоплі сортів «Утро раннее»

Зразки	Кількість діб після опромінення	
	20	45
Висота рослин, мм		
Контрольний	75,0	172,1
Дослідний, 120 Дж/м <sup>2</sup>	105,1	230,6
Дослідний, 240 Дж/м <sup>2</sup>	106,4	229,7

Таблиця 4.4

Динаміка висоти рослин при передпосадковим УФ-опроміненні клубнів картоплі сортів «Рокко»

Зразки	Кількість діб після опромінення	
	20	45
Висота рослин, мм		
Контрольний	75,0	172,1
Дослідний, 120 Дж/м <sup>2</sup>	103,2	215,6
Дослідний, 240 Дж/м <sup>2</sup>	102,5	212,7

Отримані дані добре узгоджуються з даними [126], де зроблено висновки, що стимулююча дія УФ-променів супроводжувалося змінами швидкості асиміляції, вуглеводного і білкового обмінів рослин, що в

подальшому вплинуло на збільшення врожаю.

В рослинах, клубні яких перед садінням були опромінені дозою УФ-С 120-240 Дж/м<sup>2</sup> посилюється вегетативний ріст, збільшується врожайність, збільшується коефіцієнт розмноження. Цей ефект може знайти практичне використання при вирощуванні картоплі без використання хімічних препаратів та стимуляторів росту. Крім того даний метод можна використовувати для прискореного розмноження особливо цінних і нових сортів картоплі для первинного насінництва.

#### **4.3 Вплив передпосівного ультрафіолетового опромінення насіння ріпаку на розвиток рослин**

На сьогодні накопичений значний експериментальний матеріал про біологічний вплив УФ-випромінення на сільськогосподарські культури [46, 52, 132]. Протягом останніх років опубліковано ряд наукових праць про вплив передпосівного опромінення насіння на схожість, ростові процеси та врожайність культур [129, 130, 135]. Обробка передпосівного матеріалу бактерицидним УФ-випромінюванням в області С збільшує енергію проростання [129, 135] та схожість насіння.

Так в [130] показано, що передпосівна обробка УФ-опроміненням насіння кінських бобів сприяє підвищенню адаптаційних властивостей рослин, які проростають в екстремальних умовах.

В роботі [129] відзначається позитивний вплив передпосівної обробки насіння пшениці УФ-випромінюванням С діапазону: підвищується енергія проростання та польова схожість насіння, що забезпечує стійкі врожаї. В [135] показано, що при УФ-С опроміненні насіння моркви прискорюється ріст наземної частини рослин і збільшується продуктивність на 20 %.

В роботі [144] проведені порівняльні дослідження процесів зростання рослин ріпаку при передпосівному УФ-опроміненні насіння, в тому числі і генномодифікованих сортів.

В [144] досліджували вплив передпосівного ультрафіолетового опромінення насіння ріпаку на схожість та швидкість зростання рослин в залежності від дози опромінення, а також відмінності цього впливу для генномодифікованого насіння. В якості джерела УФ-С випромінювання, я і в роботі [140] використовували розрядні лампи низького тиску потужністю 20 Вт (ZW20D15W), вимірювання рівня опроміненості здійснювали радіометром Тензор-31 з використанням стандартних методик [141].

Для ідентифікації генномодифікованого сорту ріпаку використовували тест-набір AgraStrip RUR-HS фірми ROMER Labs [145], за допомогою якого визначали вміст протеїну CP4 EPSPS. Аналіз здійснено відповідно до стандарту Асоціації торгівлі зерном і кормами GAFTA 124 [146]. Отримані наступні результати імунологічного аналізу: зразок 1 – не генномодифікований, а зразок 2 – генномодифікований.

При вирощуванні рослин використовували спеціальний ґрунт – субстрат «універсальний» [147], що включає всі необхідні макро- і мікроелементи. Температура повітря в приміщенні підтримували в межах 24-26 °С при відносній вологості повітря від 60 до 75%. Цикл зростання до контрольного вимірювання склав 10 діб. Вимірювання проводилися на 20 рослинах в кожному експерименті.

Після УФ-опромінення насіння ріпаку (зразок 1) його схожість зросла на 14,9% і 19,8% при дозах, відповідно 50, 120 Дж/м<sup>2</sup>, а для генномодифікованих рослин насіння ріпаку (зразок 2) – схожість зменшилася на 7-10%. Зменшення «активності» схожості насіння ріпаку спостерігається і при опромінюванні більш високою дозою 240 Дж/м<sup>2</sup>. Ця закономірність «активності» насіння ріпаку після УФ-опромінювання спостерігається більш виражено в процесі росту рослин, їх наземної частини.

Результати дослідження зведені в таблицях 4.5 та 4.6.

Представлені експериментальні дані свідчать про те, що максимальне збільшення наземної частини рослин ріпаку спостерігається при дозах 120 Дж/м<sup>2</sup>.

Таблиця 4.5

Середня довжина рослин ріпаку при різних дозах опромінення

Номер зразка	Доза опромінення, Дж/м <sup>2</sup>	Середня довжина наземної частини, мм	
		після 5 діб зростання	після 10 діб зростання
Контрольний	-	24,2	46,3
№ 1	50	26,1	53,4
	120	27,8	64,6
	240	25,2	47,2
Контрольний генномодифікований	-	23,6	58,7
№ 2	50	22,3	54,0

Таблиця 4.6

Середня біомаса ріпаку рослин після 10 діб зростання при різних дозах опромінення ультрафіолетового опромінювання

Ріпак	Доза опромінення, Дж/м <sup>2</sup>	Кількість біомаси, г
Контрольний	-	25,1
№ 1	50	27,9
	120	29,7
	240	25,6
Контрольний	-	27,8
№ 2	50	23,5

Встановлено, що при опроміненні насіння ріпаку дозами 50, 120 і 240 Дж/м<sup>2</sup> середня довжина наземної частини була більшою, ніж для контрольного зразка: при опроміненні дозою 50 Дж/м<sup>2</sup> - на 7,8%, при опроміненні дозою 120 Дж/м<sup>2</sup> на 14,9%, а при 240 Дж/м<sup>2</sup> на 4,1 %.

Збільшення біомаси в процесі зростання (зразок 1) при дозах 50 Дж/м<sup>2</sup> склало 11%, при дозах 120 Дж/м<sup>2</sup> – 18,3 %, а при дозах 240 Дж/м<sup>2</sup> зменшилось на 2 %. Для генномодифікованих рослин ріпаку (зразок 2) біомаса в порівнянні з контрольними зразками при опроміненні дозою 50 Дж/м<sup>2</sup> зменшилося на 15%.

Таким чином, в рослинах ріпаку (зразок 1), насіння яких було опромінено дозами УФ-С 50-240 Дж/м<sup>2</sup> підвищується схожість насіння, прискорюється ріст наземної частини рослин і відповідно, збільшується біомаса в порівнянні з контрольним зразком. Для насіння генномодифікованого (зразок 2) ця закономірність не спостерігається, оскільки при УФ-С опромінюванні зменшується схожість насіння і зменшується біомаса (таблиця 4.6).

Передпосівне опромінення обробки насіння УФ-С може знайти практичне використання при вирощуванні ріпаку без використання хімічних препаратів та стимуляторів росту.

#### **4.4 Ефективність проростання насіння ріпаку при передпосівному опроміненні його УФ-випромінюванням різного спектрального складу**

Одна із основних задач сільськогосподарського комплексу – збільшення кількості та якості продукції рослинництва. Для вирішення даної проблеми вчені та фахівці сільського господарства постійно вдосконалюють методи і технічні засоби для підвищення продуктивності рослинної продукції [148-150].

Великий інтерес для стимулювання зростання та підвищення стійкості рослин до зовнішніх чинників і збільшення врожайності сільськогосподарських культур викликає використання оптичного випромінювання - передпосівна обробка насіння сільськогосподарських культур ультрафіолетовим випромінюванням [132, 151, 152, 153].

Одним з ефективних способів підвищення якості посівного матеріалу є вплив на насіння фізичними факторами, які в порівнянні з хімічними не забруднюють навколишнього середовища і не володіють післядією. Для цього в сільськогосподарській практиці використовують різноманітні прийоми передпосівної обробки насіння: ультрафіолетове опромінювання [132], обігрів [154], вплив іонізуючих гамма-променів [155], електричних [156] і магнітних полів [157, 158] та електромагнітних випромінювань [159].

Незважаючи на короткий період дослідження передпосівної обробки насіння УФ-опроміненням уже опубліковано достатньо значну кількість праць [132, 151, 160].

Так в роботі [161] було досліджено вплив УФ-В на проростання 19 видів рослин. І той факт, що тільки два із трьох сортів томатів були більш чутливими до дози опромінення, підтверджує, що для кожного сорту окремо повинна бути підібрана найбільш ефективна доза. Авторами роботи [152] показано, що при опроміненні УФ-В на протязі 15 хвилин, уповільнюється проростання та зменшується ріст розсади. В інших роботах представлені результати, щодо опромінювання УФ-В сої [162], різних сортів квасолі [163].

При передпосівному УФ-опроміненні насіння величина енергії, спектральний склад і час обробки різні для кожної культури, тому вибір режиму обробки вимагає детального дослідження та диференційованого підходу.

Як показав аналіз літературних джерел, автори не завжди наводять інформацію щодо параметрів проведення експерименту, і підтвердити отримані результати або спростувати їх не представляється можливим.

В роботі [144] проведені дослідження передпосівного впливу трьох різних областей С (200-280 нм), В (280-320 нм) та А (320-400 нм) ультрафіолетового опромінення насіння ріпаку на біологічні процеси (енергія проростання, здатність до проростання та схожість) в лабораторних умовах.

Енергію проростання, здатність до проростання та схожість насіння ріпаку визначали в лабораторних умовах за методиками згідно з [164, 165].

Порівнювали ці показники для насіння опроміненого в різних енергетичних областях А, В, С ультрафіолетового випромінювання при однакових дозах опромінення  $120 \text{ Дж/м}^2$  з контрольними зразками без опромінення. Під енергією проростання розуміють відсоткову кількість пророслого насіння за 72 години, здатністю до проростання – відсоткову кількість пророслого насіння за 120 годин, а схожістю насіння – відсоткову кількість пророслого насіння ріпаку за 7 діб.

Проби для проведення дослідження відбирали із партії ріпаку відповідно до вимог [165]. Для проведення експериментальних досліджень із отриманих проб було відраховано 200 насінин для контрольного зразку та по 200 зернин для опромінення в різних енергетичних областях ультрафіолетового спектру випромінювання.

Насіння розкладалось на кількох шарах зволоженого фільтрувального паперу в чашках Петрі (рис. 4.4) і витримувались в термостаті за температури  $7 \pm 2^\circ \text{C}$  протягом 1 доби. Далі охолоджені зразки насіння, крім контрольного опромінювали в різних енергетичних областях ультрафіолетового випромінювання при дозах  $120 \text{ Дж/м}^2$ .

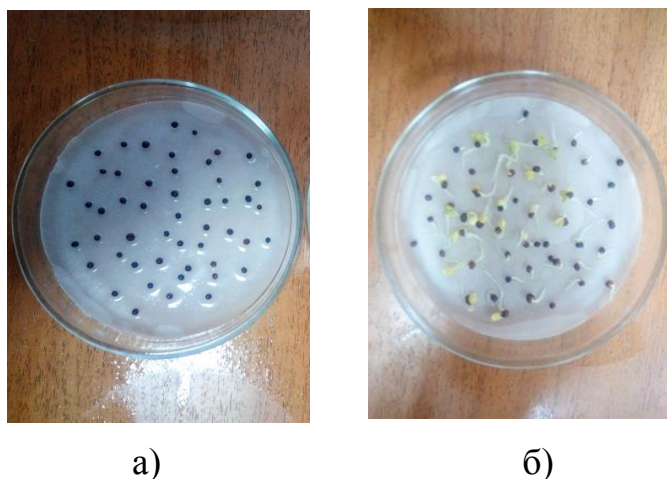


Рис. 4.4 Насіння ріпаку розкладене на зволоженому фільтрувальному папері в чашках Петрі: а) до опромінення, б) опромінене та проросле

Для опромінення застосовували УФ лампи різних типів, що здатні



випромінювати в різних енергетичних областях ультрафіолетового спектру [141, 142]:

1. Область УФ-А: лампа ЛУФ 65/80, потужністю 80 Вт.
2. Область УФ-В: лампа ЛЭ-30 Вт, потужністю 30 Вт.
3. Область УФ-С: лампа ZW20D15W, потужністю 20 Вт.

Відстань від лампи до зразків насіння становила 0,25 м. Вимірювання доз УФ-опромінення в різних енергетичних областях ультрафіолетового діапазону здійснювали за допомогою радіометра «Тензор-31» з використанням методики [31].

Опромінені і контрольні зразки насіння пророщували в чашках Петрі за температури повітря  $25 \pm 2$  °C (рис. 4.5).

Результати дослідження наведені на рисунку 4.5 та зведені в таблиці 4.7.

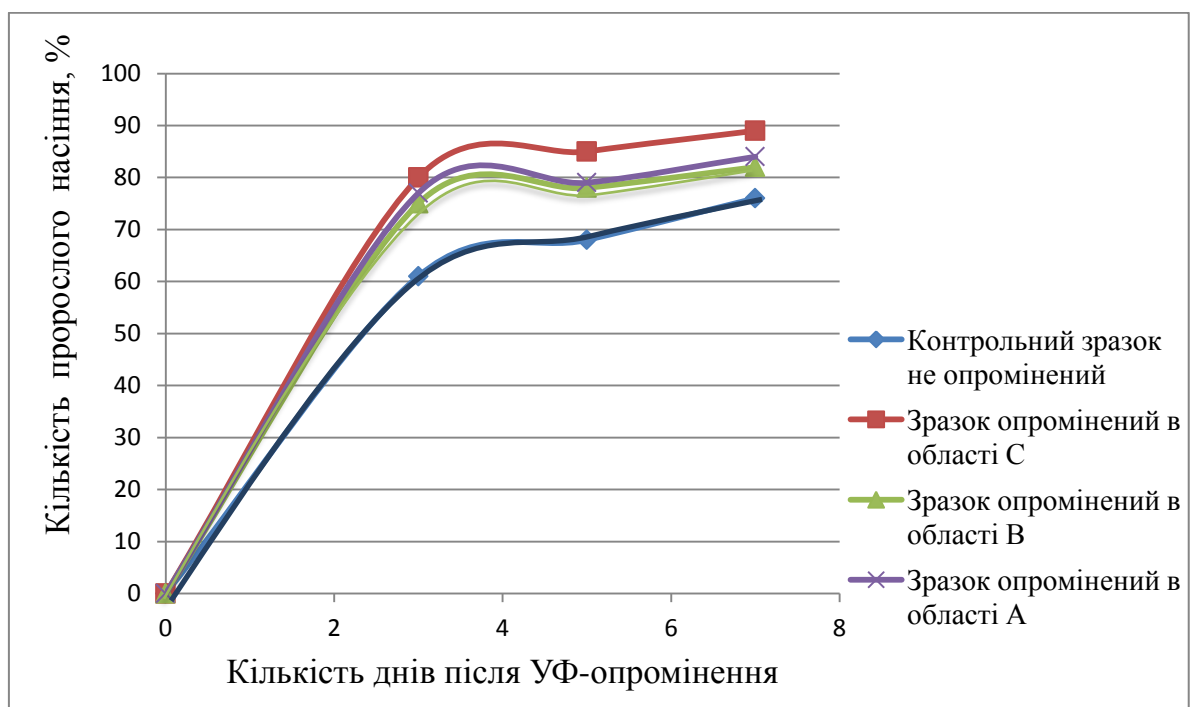


Рис. 4.5 Залежність кількості пророслого насіння від часу проростання

Результати дослідження енергії проростання насіння ріпаку в залежності від енергетичної дози ультрафіолетового опромінення в областях А, В, С показують:

- енергія проростання збільшується в порівнянні з контрольним зразком на 31,1 % для області С, для області В збільшується на 23%, а для області А – на 26,2 %;

- здатність до проростання збільшується в порівнянні з контрольним зразком на 25,0 % для області С, для області В на 14,7 %, а для області А – на 16,2 %;

- схожість збільшується в порівнянні з контрольним зразком на 17,1 % для області С, для області В на 7,9 %, а для області А – на 10,5 %.

Таблиця 4.7

Енергія проростання, здатність до проростання та схожість опромінених в областях УФ-С, УФ-В та УФ-А дозою 120 Дж/м<sup>2</sup> в та контрольного зразків насіння ріпаку

	Контрольний зразок	Зразок опромінений в області УФ-С	Зразок опромінений в області УФ-В	Зразок опромінений в області УФ-А
Енергія проростання, %	61	80	75	77
Відсоток збільшення, %	-	31,1	23,0	26,2
Здатність до проростання, %	68	85	78	79
Відсоток збільшення, %	-	25,0	14,7	16,2
Схожість, %	76	89	82	84
Відсоток збільшення, %	-	17,1	7,9	10,5

Таким чином, проведені дослідження енергії проростання, здатності до проростання та схожості насіння ріпаку показали, що УФ-опромінення в різних енергетичних областях А, В, С при дозах  $120 \text{ Дж/м}^2$  позитивно впливає на насіння ріпаку, оскільки збільшується енергія проростання на 23-31%, здатність до проростання на 14-25 %, а схожість збільшується на 8-17 %.

Крім того, як показують дослідження при однакових дозах УФ-опромінювання енергія проростання для області С більша на 5-8% в порівнянні з УФ областями А і В, при цьому здатність до проростання для області С більша на 9-11% , а схожість для області С більша в порівнянні з областю В на 9,2 %, а в порівнянні з областю А на 6,6.

Порівнюючи дію енергетичних областей різних УФ-діапазонів на передпосівне опромінення насіння ріпаку, можна стверджувати, що УФ-випромінювання незалежно від спектрального діапазону позитивно впливає на енергію проростання, здатність до проростання та схожість рослин.

#### **4.5 Вплив ультрафіолетового випромінювання на проростання, схожість та ростові процеси насіння пшениці**

Вчені та фахівці сільського господарства, для поліпшення посівних якостей насіння, постійно вдосконалюють і розробляють нові агрозаходи і технічні засоби для передпосівної обробки насіння для стимуляції проростання [166, 167, 168].

Забезпечення високої врожайності культури при оптимальних затратах та високоякісних показниках насіння, а також освоєння технологій отримання нових видів продукції – важливі завдання агропромислового комплексу на найближчу перспективу. Тому актуальність роботи визначається пошуком та освоєнням технологій отримання ефективних фізичних біостимуляторів для передпосівної обробки насіння [132], що сприяють підвищенню посівних якостей, посиленню фотосинтетичної активності, виживанню і врожайності [169].

До фізичних факторів впливу на посівний матеріал можна віднести електромагнітні поля різних діапазонів (від  $\gamma$ -випромінювання до радіочастотного дециметрового діапазону [170]), рентгенівське випромінювання [171], ультрафіолетове [136] і оптичне випромінювання (особливо лазерне червоне випромінювання з  $\lambda=632,8$  нм [172]), інфрачервоне випромінювання [173], електричне поле коронного розряду, ультразвук [174], дія магнітного поля [175]. Відомі дослідження, в яких вплив слабких фізичних факторів призводив до стимуляції врожайності і підвищенню якості продукції [169].

В останні роки для інтенсифікації рослинництва в практику сільського господарства стали активно впроваджувати електрофізичні методи обробки рослин та насіння зернових, овочевих культур [132, 167, 176]. Застосовуючи електромагнітний вплив різної частоти, можливо отримати прибавку до врожаю 10-12%, знищити насіннєву інфекцію, збільшити енергію проростання і схожість насіння [177]. В роботі [177] наводяться дані, що в разі обробки електромагнітним полем високої частоти (ЕМП НВЧ) підвищується біологічна цінність зерна пшениці за рахунок збільшення вмісту деяких водорозчинних вітамінів. У дослідженнях на зернових, овочевих, кормових культурах було виявлено, що короткочасний вплив високовольтного коронного розряду призводить до прискорення проростання насіння як в лабораторних так і в польових умовах. Вважається, що в основному на енергію проростання і підвищення польової схожості насіння за такої обробки позитивно впливає їх поверхнєве знезараження, яке обмежує поширення і ступінь розвитку борошнистої роси, бурої іржі, корневих гнилей та інших хвороб. Ефективність електромагнітного впливу залежить від частоти імпульсів і часу опромінення насіння [167, 177].

У статті [178] представлені результати застосування лазерної технології обробки насіння пшениці. При оптимальних середніх дозах опромінення:  $0,22 \text{ мДж/см}^2$  -  $0,54 \text{ мДж/см}^2$  -  $0,82 \text{ мДж/см}^2$  лазерна передпосівна обробка насіння довжиною хвилі  $\lambda=650$  нм сприяє суттєвому підвищенню врожайності

пшениці сорту Іргіна. В роботі відзначено перевагу впливу передпосівної обробки насіння зеленим лазерним випромінюванням в порівнянні з синім і червоним лазерним випромінюванням, що впливає на ріст кореневої системи і надземної частини пшениці.

Ефективність застосування електротеплового випромінювання в технологічному процесі передпосівної обробки насіння пшениці була показана авторами [179]. Аналіз результатів лабораторних і польових досліджень з часом обробки 5 с (при температур 45 і 50 °C) та з часом обробки 3 с (при температурі 50 і 55 °C) показує збільшення лабораторної схожості насіння пшениці щодо контрольних зразків при всіх режимах обробки на 25,4÷54,5%. Крім того, зараженість досліджуваних зразків фітопатогенами знизилася до 66,6-87,5%, а збудниками пліснявіння до 90,9%.

Значне число експериментальних робіт присвячено УФ-опроміненню посівного матеріалу. Відзначено високу чутливість рослин до умов опромінення [136, 144, 180].

В роботі [180] зерна пшениці опромінювали в передпосівний період під час переміщення на стрічці транспортеру. Зерно піддавалось УФ-опроміненню ртутно-кварцовою лампою БНП02-30-001У3,5 (пристрій спектр-2) з інтенсивністю енергетичного опромінення 30 Вт/м<sup>2</sup>, що розташовувалася на відстані 250 мм від об'єкта. Зниження вільнорадикальних процесів в насінні можливо за рахунок синтезу великої кількості антиоксидантів, концентрація яких при цьому зростає в кілька разів, особливо в зародку насіння пшениці, тобто відзначається активація антиоксидантної системи у відповідь на УФ-опромінення.

В роботі [181] розглянуто закономірності прояву активності пероксидази в процесі набухання і проростання насіння пшениці (*Triticum aestivum* L.) сорту Ростовчанка 5 та показників перекисного окислення ліпідів в проростках пшениці після опромінення УФ джерелом в тих же умовах, що і в роботі [180]. Обрані режими опромінення протягом 5 і 60 хвилин в ході експерименту дозволили встановити, що саме варіант тривалого

ультрафіолетового опромінювання насіння протягом 60 хвилин підвищує їх схожість на 12-15%.

Автори роботи [182] вивчали вплив ультрафіолетового опромінення від джерела VL-6.LC з довжиною хвилі 365 нм протягом 5 і 30 хв на насіння ярої та озимої пшениці різних сортів. Маса проростків пшениці після 30 хв опромінення збільшується у всіх сортів: для сортів «Московська 39» і «Ювілейна 100» приріст склав 20 %. У всіх досліджуваних сортів пшениці, за винятком сорту «Дарина», істотно збільшилася довжина коренів - на 26-60 %. Автори при дослідженні впливу ультрафіолетового випромінювання на посівні якості насіння і біометричні показники рослин різних сільгоспкультур, встановили, що дія УФ-випромінювання вибіркова, для насіння кожного сорту існує своя оптимальна кількість поглиненої енергії.

Не дивлячись на велику кількість досліджень [136, 144, 180-182] питання щодо визначення раціонального діапазону доз опромінення різних культур, в тому числі різних сортів пшениці продовжує залишатися актуальним.

В роботі [183] проведені дослідження впливу передпосівного ультрафіолетового опромінення насіння пшениці озимої на біологічні процеси (енергія проростання, схожість та зростання).

Енергія проростання насіння є важливим показником якості посівного матеріалу. Вона характеризує ступінь життєздатності насіння, здатність давати швидкі і дружні сходи, що має велике значення для одержання високого врожаю.

Лабораторна схожість насіння - кількісний показник його якості, який є мірилом життєздатності. У насіння з пониженою схожістю різко погіршуються врожайні властивості і досить часто, навіть збільшенням норми висіву, неможливо досягти високого врожаю.

Енергію проростання та схожість насіння пшениці визначали в лабораторних умовах за методикою згідно з [165]. Отримані показники для насіння опроміненого різними дозами УФ-С порівнювали з контрольними

зразками (без опромінення).

Зразки пшениці м'якої озимої для проведення дослідження представлені лабораторією зернових культур Устимівської дослідної станції рослинництва.

Для проведення дослідів було відраховано 200 насінин для контрольного зразку та по 200 зернин для опромінення дозами: 50 Дж/м<sup>2</sup>; 120 Дж/м<sup>2</sup>; 500 Дж/м<sup>2</sup> та 1000 Дж/м<sup>2</sup>. Були досліджені зразки: № 1 – Подолянка (UDS02111); № 2 – Тарас (UDS05054); № 3 – Астра (UDS04766) та № 4 – Южанка (UDS04779) врожаю 2018 року.

Насіння розкладались на кількох шарах зволоженого фільтрувального паперу в чашках Петрі і витримувались в термостаті за температури  $7 \pm 2^{\circ}\text{C}$  протягом 1 доби. Далі охолоджені зразки (крім контрольних) опромінювали УФ-С дозами з використанням безозонових кварцових ультрафіолетових ламп [184].

Для опромінення застосовували УФ лампу типу ZW20D15W потужністю 20 Вт [17]. Відстань від лампи до зразків насіння становила 0,25 м. Вимірювання дози УФ-С випромінювання здійснювали за допомогою радіометра «Тензор-31» з використанням методики [31].

Опромінені і контрольні зразки насіння пророщували в чашках Петрі за температури повітря  $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Перший облік проростків насіння (енергія проростання) проводили через 4 доби, а відсоток схожості – через 8 діб.

В лабораторних умовах проведені дослідження з визначення енергії проростання та схожості насіння пшениці [185] після УФ-опромінення різними дозами: 50 Дж/м<sup>2</sup>; 120 Дж/м<sup>2</sup>; 500 Дж/м<sup>2</sup> та 1000 Дж/м<sup>2</sup>. Результати дослідження наведені на рисунку 4.6 та зведені в таблицях 4.8 та 4.9.

З представленої залежності (рис. 4.6) енергії проростання від дози ультрафіолетового опромінення визначили, що оптимальними дозами для опромінення насіння пшениці є дози 400-600 Дж/м<sup>2</sup>, при яких кількість пророслого насіння є максимальною. Дози, наближені до 1000 Дж/м<sup>2</sup> спричинили незначний спад показника енергії проростання.

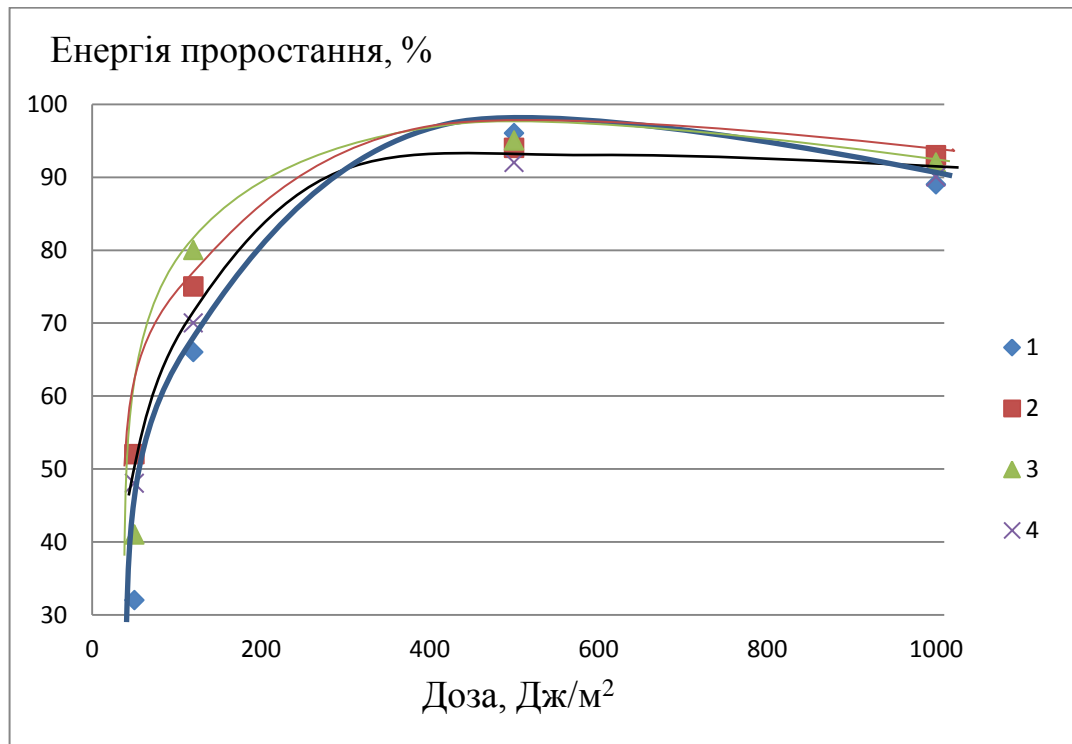


Рис. 4.6 Енергія проростання насіння пшениці після опромінення (зразки № 1, 2, 3, 4)

Результати досліджень енергії проростання та схожості насіння пшениці різних сортів при дозі УФ-С опромінення 500 Дж/м<sup>2</sup> (таблиця 4.8) показали, що енергія проростання збільшилася в порівнянні з контрольними зразками на 7-12%, а схожість на 9-14,6%.

У позитивних результатах впливу УФ-опромінення на насіння пшениці при визначенні схожості відзначили і ефективніший розвиток кореневої системи і наземної частини. Дані представлені в таблиці 4.9.

При цьому збільшення кореневої системи для опромінених зразків (таблиця 4.8) склала 11,6-39,8 %, а збільшення надземної частини 13,5-24,7% (таблиця 4.9).

Оптимальною УФ-дозою в області С для цих сортів Подолянка, Тарас, Астра та Южанка є доза 400-600 Дж/м<sup>2</sup>. Енергія проростання для досліджених зразків після УФ-опромінення збільшилася на 7-12 %, а схожість на 9-15%. Довжина коренів збільшилася на 11-40%, а наземна частина на 13-25%.



Таблиця 4.8

Енергія проростання та схожість контрольних зразків та опромінених  
при дозі 500 Дж/м<sup>2</sup>

Зразки	Енергія проростання, %	Схожість, %
1 – контрольний	88	89
1 – опромінений	96	97
2 – контрольний	85	86
2 – опромінений	91	94
3 – контрольний	86	88
3 – опромінений	95	96
4 – контрольний	82	82
4 – опромінений	92	94

Таблиця 4.9.

Результати середніх значень довжини коренів та наземної частини

Зразки	Довжина коренів, мм	Наземна частина (стебло), мм
1 – контрольний	38,7	109,3
1 – опромінений	43,2	124,1
2 – контрольний	33,4	98,2
2 – опромінений	37,6	117,4
3 – контрольний	42,1	114,1
3 – опромінений	46,3	121,2
4 – контрольний	32,4	98,4
4 – опромінений	45,3	122,8

Передпосівна обробка насіння пшениці озимої м'якої ультрафіолетовим опроміненням в С діапазоні може знайти практичне використання при

виращуванні рослин без використання стимуляторів росту, хімічних препаратів. Таким чином можливе зменшення кількості пестицидів у передпосівній обробці насіння або повна відмова від їх використання в перспективі як це вже тривалий час робиться в розвинених країнах.

#### **4.6 Вплив УФ-випромінювання на передпосівні властивості моркви різних сортів**

В ході селекційного процесу, в первинному розмноженні і далі в процесі виробництва для ряду овочевих культур виникають проблеми, пов'язані з низькими посівними якостями насіння. Формування екологічно різноякісного насіння різної життєздатності - це результат реакції насіннєвих рослин на різні ґрунтово-кліматичні чинники. У сучасних умовах з метою поліпшення посівних якостей насіння і енергії проростання використовуються різні хімічні або фізичні способи виведення їх біологічної системи зі стану спокою, у тому числі, випромінювання різної природи: оптичне, радіаційне, електромагнітне і т. ін.

Насіння моркви відносяться до групи дрібного насіння, до того ж в їх оболонках міститься велика кількість ефірних олій (до 1%), тому насінню потрібна велика кількість води для проростання та, в силу невеликих розмірів, воно містить невеликий запас поживних речовин. Все це обумовлює використання в процесі підготовки насіння до сівби різних способів стимулювання їх проростання [136, 144, 157, 159, 160, 168, 183].

Щоб морква швидко проросла і дала хороший врожай, потрібно провести передпосівну обробку насіння. Застосовують наступні способи передпосівної підготовки насіння: стратифікацію, снігування, механічний, термічний і хімічний вплив на зовнішні покриви, обробку мікроелементами і стимуляторами росту, звукове, ультразвукове і магнітне опромінення, дезінфекцію та дезінсекцію. На проростання і польову схожість насіння надають сприятливу дію різні способи передпосівної підготовки [186].

Позитивні результати отримані при обробці насіння струмом високої частоти, холодом, розчинами сірчаноокислого марганцю і сірчаноокислої міді (0,05%), бромистого калію, нікотинової та бурштинової кислот, гетероауксину, а також опромінення рентгенівськими і гамма-променями. Одним з ефективних способів збільшення продуктивності передпосівної обробки насіння є стимуляція насіння ультрафіолетовим (УФ) опроміненням [132, 142]. Передпосівне УФ-опромінення насіння позитивно впливає на збільшення врожайності сільськогосподарських культур, збільшуючи їх стійкість до різних захворювань і несприятливих кліматичних факторів (в тому числі до посухи) [187].

При ультрафіолетовому опроміненні насіння змінюється проникність біологічних мембран клітин, що призводить до стимуляції початкових ростових процесів, зважає змін рівень окислення ліпідів, рН і активність АТФ, що веде до посилення біоенергетичних і біосинтетичних процесів, що призводить до збільшення енергетичного потенціалу насіння. Крім того, опромінення насіння ультрафіолетовим випромінюванням спільно з попереднім їх зрошенням невеликими дозами перекису водню призводить до знищення фітопатогенів, тобто до знезараження насіння (екологічно безпечний аналог традиційного хімічного протруєння). Однак при цьому необхідно враховувати, що низькі дози УФ-випромінювання не роблять істотного впливу на мікрофлору насіння і зумовлюють лише незначне підвищення схожості, а високі дози УФ-випромінювання забезпечують більш ефективне знищення фітопатогенів, але знижують схожість насіння. Поряд з цим, УФ-опромінення мобілізує в насінні генетично закладені резерви зростання, які обумовлені багатовіковою адаптацією рослин до сонячного випромінювання. В результаті чого насіння мобілізує свої приховані ресурси, які йдуть на посилення росту і розвитку рослин.

В роботі [188] повідомлялось про диференційовану реакцію на УФ-В опромінення кількості біомаси в редисі та моркві. Показано, що це збільшення на 20% при УФ-В опроміненні зумовило значне зниження кореневої біомаси

моркви та суттєво виражений приріст біомаси редиски.

Так в [129] досліджувався вплив УФ-опромінення сухого насіння моркви на її зростання, морфогенез та рівень вмісту фітогормонів. Показано, що опромінення насіння моркви УФ-С призводить до прискорення росту наземної частини цих рослин в порівнянні з контрольними. Різниця в кінці вегетації складала 57%. Опромінення УФ-В також стимулює ріст наземної частини рослин, але в меншій мірі ніж УФ-С, а УФ-А практично не впливає на результат. Продуктивність рослин при передпосівному опроміненні насіння також збільшилась – середня вага коренеплодів при опроміненні УФ-С складала 85,4 г проти 68,8 г для контрольних рослин. Також показано, що передпосівна обробка УФ-С призвела до збільшення вмісту ауксинів і зменшення вмісту абсцизової кислоти. На основі цих досліджень зроблені висновки про вплив УФ радіації на динаміку листкового утворення, росту коренеплодів моркви, а також на вміст і активність фітогормонів.

У лабораторних умовах в роботі [189] вивчали вплив УФ-С опромінення насіння моркви різних сортів на їх ростові процеси (енергія проростання та схожість) і його розвиток в польових умовах.

Насіння моркви відрізняється зниженою життєздатністю в порівнянні з насінням інших рослин. Енергія його проростання визначається на 5-й день, а схожість на 10-й день [165], для насіння інших культур цей показник не перевищує 3-х і 7-и днів, відповідно.

Для проведення досліджень було відібрано по 200 насінин моркви різних сортів: Перфекція, Шантане Роял, Долянка, Яскрава, Нантская для контрольного зразка і по 200 насінин для опромінення різними дозами УФ-С. Насіння розкладали на кількох шарах зволоженого фільтрувального паперу в чашках Петрі і витримували в термостаті при температурі  $7 \pm 2^{\circ}\text{C}$  протягом 1 доби.

Далі охолоджені зразки (крім контрольних) опромінювали УФ-С дозами  $120 \text{ Дж/м}^2$ ,  $200 \text{ Дж/м}^2$ ,  $500 \text{ Дж/м}^2$  і  $1000 \text{ Дж/м}^2$ . Як джерело опромінення використовували УФ-лампу типу ZW20D15W потужністю 20 Вт [142],

характеристики якої представлені в таблиці 4.10. Відстань від лампи до зразків насіння становила 0,25 м. Часом опромінення і відстанню до УФ-джерела можна створити необхідну дозу опромінення. Вимірювання дози УФ-С випромінювання здійснювали за допомогою радіометра «Тензор-31» з використанням методики [31]. Опромінені і контрольні зразки насіння пророщували в чашках Петрі при температурі повітря  $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 4.10

Характеристики лампи з кварцового скла  
Jiangyin Feiyang Instrument Co., Ltd.

Тип лампи	Потужність Р, Вт	Струм I, мА	Напруга на лампи U, В	УФ-опромінення на відстані 1 м, Вт/см <sup>2</sup>
ZW20D15W(Y)-436	20	420	40-55	62-69

Схема установки для передпосівного опромінення насіння моркви представлена на рисунку 4.7.

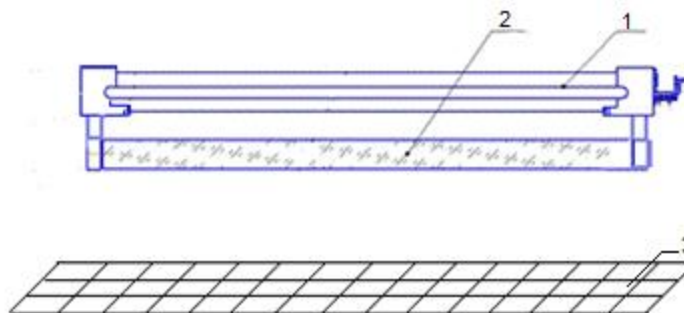


Рис. 4.7. Конструкція установки для УФ-опромінення насіння моркви  
(1 - корпус опромінювача; 2 - УФ-лампа, 3 - поверхня з алюмінію).

Найбільш важливі показники якості насіння - це енергія проростання і схожість [165]. Численними дослідженнями встановлено, що насіння з високою енергією проростання дають дружні і рівномірні сходи. Швидке проростання насіння свідчить про те, що проростки будуть міцними і стійкими

до несприятливих умов навколишнього середовища в період сівби та отримання сходів. Від лабораторної схожості, поряд з іншими факторами, в значній мірі залежить польова схожість насіння. Польова схожість насіння з низькою енергією проростання особливо інтенсивно падає: поява сходів на полі розтягується, а це підвищує загрозу пошкодження проростків грибковими хворобами і шкідниками, що призводить до їх загибелі.

Ці показники були використані нами для оцінки впливу УФ-С випромінювання на ростові процеси насіння моркви. Енергію проростання і схожість насіння моркви визначали в лабораторних умовах за методиками згідно [165]. Перший підрахунок проростків насіння (енергія проростання) проводили через 5 діб, а відсоток схожості - через 10 діб. Порівнювали ці показники для насіння, опроміненого різними дозами УФ-С випромінювання, з контрольними зразками без опромінення. Отримані результати представлені на рисунку 4.8.

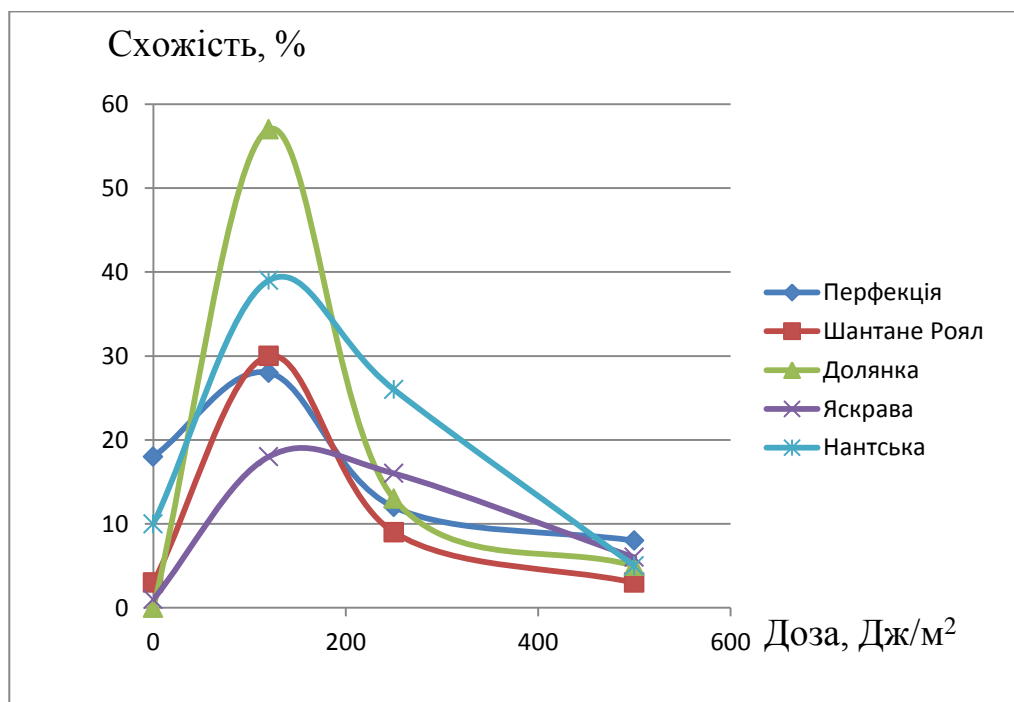


Рис. 4.8 Залежність схожості насіння моркви сортів Перфекція, Шантане Роял, Долянка, Яскрава, Нантська від дози УФ-С випромінювання

Результати експерименту (рис. 4.8) показують, що опромінення насіння

моркви всіх досліджуваних сортів зумовлює активну стимуляцію ростових процесів при дозі УФ-опромінення в  $120 \text{ Дж/м}^2$ , для сорту Яскрава можна виділити діапазон  $120\text{-}200 \text{ Дж/м}^2$ . Доза радіації  $120\text{-}150 \text{ Дж/м}^2$  може бути визначена як найбільш оптимальна, при якій відсоток схожості насіння моркви має максимальне значення для всіх досліджуваних сортів. Найбільший приріст схожості (різниця між опроміненим і контрольним зразком)  $57\%$  відзначається для сорту Долянка, однаковий приріст -  $27\text{-}29\%$  показали сорти Шантане Роял і Нантська. При дозах радіації більше  $200\text{-}250 \text{ Дж/м}^2$  спостерігали зниження досліджуваних показників, а при дозі  $500 \text{ Дж/м}^2$  схожість сорту Долянка була відсутня.

На рисунку 4.8 не вказана доза опромінення  $1000 \text{ Дж/м}^2$ , оскільки при великих значеннях УФ-опромінення спостерігається зменшення схожості в кілька разів порівняно з дозами  $100\text{-}200 \text{ Дж/м}^2$ . Для підтвердження результатів, отриманих в лабораторних умовах, були проведені польові дослідження - посів опроміненого насіння на земельній ділянці розміром в  $10 \text{ м}^2$  (по  $5 \text{ м}^2$  для контрольних зразків (неопромінених) і  $5 \text{ м}^2$  для опромінених зразків).

Встановлено, що зразки насіння, опромінені УФ-С дозою  $120 \text{ Дж/м}^2$ , зійшли в порівнянні з контрольними раніше на 9 діб, при цьому кількість пророслого насіння була на  $43\%$  більше в порівнянні з контрольними зразками. Крім того, в процесі росту, відзначали більш здоровий розвиток рослин опроміненого насіння, що в подальшому вплинуло на кінцевий результат. Так, кількість моркви з опроміненого насіння в масовому еквіваленті перевищила в 1,9 разів урожай контрольного зразка.

Таким чином, нашими дослідженнями встановлено загальну закономірність зміни величини схожості насіння різних сортів моркви та їх ростовими процесами. Очевидно, на величину інтенсивності схожості різних сортів моркви в більшій мірі впливає доза УФ-С випромінювання, а також їх біологічні та морфологічні особливості.

Проведені дослідження основних показників ростових процесів (енергії

проростання і схожості насіння) моркви різних сортів показали, що УФ-С випромінювання при дозах 120-150 Дж/м<sup>2</sup> позитивно впливає на насіння моркви досліджуваних сортів, оскільки збільшується схожість більше, ніж на 27 %, а врожайність в польових умовах збільшується в 1,9 рази.

На підставі проведених досліджень та отриманих результатів можна зробити висновок, що використання УФ-випромінювання в діапазоні довжин хвиль 200-280 нм для передпосівної обробки насіння моркви має хорошу перспективу в якості стимулятора ростових процесів і може бути рекомендований для ряду культур, для яких інші способи підготовки насіння не дають задовільних результатів.

Запропонований спосіб є екологічно більш вигідним у порівнянні з традиційною хімічною стимуляцією насіння, тому, що не забруднює ґрунт, сприяє підвищенню стійкості рослин до впливу різних стресових факторів. Крім того, якщо УФ-промені прискорюють проростання насіння, очікується, що вони будуть сприяти їх використанню для селекції і вирощування рослин. Навпаки, якщо УФ-промені пригнічують проростання насіння, це може бути використано для боротьби з бур'янами.



## Висновки до розділу

1. Окрім видимої частини спектру оптичного випромінювання, інтенсивність багатьох фізіологічних процесів, формування рослин і продуктивність культур істотно визначається довгохвильовим і середньохвильовим ультрафіолетом.

2. Довгохвильове УФ-випромінювання в невеликих дозах (кілька відсотків від загального потоку (ФАР)) корисно для більшості рослин. Воно стимулює синтез деяких речовин, затримує «витягування» рослин, стимулює зростання, підвищує продуктивність культур. Синє і УФ-А випромінювання поглинає кріптохроми і фототропіни. Кріптохроми беруть участь в регуляції деетиолоїзації, в налаштуванні циркадних ритмів і індукції цвітіння. Кріптохроми контролюють також біосинтез антоціанів і каротиноїдів, продишну провідність, відіграють вирішальну роль у відповідних реакціях на світло високої інтенсивності, що веде до окислювальних пошкоджень. Фототропіни впливають на такі відповідні реакції рослин як рух хлоропластів, фототропізм і відкриття продишів, а також беруть участь в ряді процесів, які оптимізують інтенсивність фотосинтезу і стимулюють їх зростання.

3. Середньохвильове УФ-випромінювання (УФ-В) в малих дозах при певних умовах приносить позитивні результати при вирощуванні рослин в закритому ґрунті. Можна домогтися прискорення зростання, збільшення розмірів плодів, цвітіння в більш ранні терміни. Фоторецептори в області УФ-В (280-300нм) - це ядерний білок UVR8. Фізіологічна роль UVR8 пов'язана із зміною експресії генів, акліматизацією і стійкістю до УФ-В випромінювання, інгібування зростання гіпокотилів. Вплив УФ-В випромінювання формує більш міцні і жорсткі листя, компактну форму рослин, збільшує концентрацію ефірних масел в травах, підвищує стійкість до впливу короткохвильового УФ-випромінювання.

4. Короткохвильове випромінювання має здатність руйнувати і змінювати біологічні молекули, тому УФ-С є небезпечним для рослин. УФ-С

випромінювання викликає також фотоліз води, утворюючи вільні радикали і перекис водню, який окисляє і руйнує молекули, що призводить до відмирання живих клітин. Однак, для окремих рослин при використанні дуже малих доз випромінювання цього діапазону можна отримувати позитивні результати, що стосуються швидкості їх зростання. Найбільш чутливою мішенню УФ-С є ДНК, яке поглинає випромінювання з максимумом близько 260 нм. У опромінених клітинах можуть з'явитися мутації, а також утворитися розриви ниток ДНК і зшивки ДНК з білками.

5. Негативний вплив на рослину може викликати також підвищений рівень УФ-В опромінення, яке може пригнічувати ріст і розвиток рослин, надавати генотоксичні ефекти на меристему, впливати на запилення і знижувати насінневу продуктивність, а також ускладнювати деякі хвороби рослин.

6. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що опромінювальні установки для вирощування рослин у закритому ґрунті повинні містити частку УФ-випромінювання в довгохвильовій і середньохвильовій області спектру, частка якого не повинна перевищувати 3-4% від рівня ФАР, при цьому для конкретних культур вона повинна уточнюватися.

7. Одним із напрямків досліджень, при створенні опромінювальних установок для теплиць - вивчення впливу УФ-радіації на продуктивність різних культур, підвищення їх стійкості до хвороби і до інших зовнішніх впливів.

8. При ультрафіолетовому опроміненні клубнів картоплі середньоранніх сортів «Утро ранее» та «Рокко» дозою 120-240 Дж/м<sup>2</sup> в області С прискорено утворювалися і розвивалися первинні коріння, посилювався вегетативний ріст та збільшувалася врожайність.

9. В рослинах ріпаку, насіння яких було опромінено дозами УФ-С 50-240 Дж/м<sup>2</sup> в порівнянні з контрольними неопроміненими зразками, зростає енергія проростання, підвищується схожість насіння, прискорюється ріст

наземної частини рослин та збільшується кількість біомаси в порівнянні з контрольним зразком, а для генномодифікованого насіння рапсу ця закономірність не спостерігається.

10. УФ-опромінення в різних енергетичних областях А, В, С при дозах  $120 \text{ Дж/м}^2$  позитивно впливає на насіння ріпаку, оскільки збільшується енергія проростання на 23-31%, здатність до проростання на 14-25 % та схожість на 8-17 %, при цьому найбільша ефективність параметрів зростання притаманна опроміненню в області С.

11. При опроміненні сортів пшениці УФ-дозою 400-600  $\text{Дж/м}^2$  в області С енергія проростання збільшилася на 7-12 %, а схожість на 9-15%, при цьому довжина коренів збільшилася на 11-40%, а наземна частина на 13-25%.

12. Проведені дослідження основних показників ростових процесів (енергії проростання і схожості) насіння моркви різних сортів показали, що УФ-С випромінювання при дозах  $120-150 \text{ Дж/м}^2$  позитивно впливає на насіння моркви, оскільки збільшується схожість на 27 %, а врожайність в польових умовах зростає в 1,9 раз.

## **РОЗДІЛ 5 ВИКОРИСТАННЯ УФ-ОПРОМІНЕННЯ ДЛЯ МІКРОБІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ АКТИВОВАНОГО ВУГІЛЛЯ ТА СИПУЧИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ**

### **5.1 Спосіб мікробіологічного очищення активованого вугілля УФ-опроміненням**

Присутність деяких мікроорганізмів в нестерильних лікарських засобах, в тому числі і в активованому вугіллі, може знижувати терапевтичну дію, або навіть інактувати її, крім того існує можливість негативної дії цих мікроорганізмів на пацієнта.

Критерії прийнятності мікробіологічної чистоти нестерильних лікарських засобів встановлені в [190]. Загальна кількість аеробів, КУО/г, має не перевищувати  $10^3$ , а загальна кількість грибів, КУО/г не перевищувати  $10^2$ .

В Україні для виробництва вугілля активованого медичного призначення використовується сировина торгівельної марки «Сілкарбон», окремі партії якої за даними результатів дослідження в державній науково-дослідній лабораторії з контролю якості лікарських засобів інституту гігієни та медичної екології імені О. М. Марзеєва не відповідають вимогам [190] за загальним вмістом дріжджових та плісневих грибів (таблиця 5.1). Тому актуальною проблемою є проведення досліджень та розроблення технології зниження вмісту вказаних грибів в активованому вугіллі.

Відомі методи зниження мікробіологічного забруднення в тому числі дріжджових та плісневих грибів, які базуються на застосуванні хімічних дезінфікуючих реагентів (сильних окиснювачів – озон, хлор), радіаційних методів (застосування іонізуючого випромінення рентгенівського та  $\gamma$ -випромінення) [8].

В роботі [191, 192] проведені дослідження можливості мікробіологічного очищення порошку активованого вугілля від плісневих та дріжджових грибів шляхом УФ-опромінення.

Відомі методи зниження мікробіологічного забруднення сипучих

матеріалів УФ-С опроміненням [193, 194], але інформація про використання цих методів для мікробіологічного очищення порошку вугілля в літературі відсутня.

Таблиця 5.1

Результати перевірки відповідності вугілля активованого вимогам нормативної документації

Показники	Вимоги НД (МКЯ № UA/11425/01/01), КУО/г	Результати аналізів, КУО/г
Мікробіологічна чистота: - загальне число аеробних мікроорганізмів (ТАМС); - загальне число дріжджових та плісневих грибів (ТУМС)	не більше $10^3$  не більше $10^2$	500 (відповідає)  2575 (не відповідає)

Для оцінки можливості очищення вугілля активованого торгівельної марки «Сілкарбон» нами проведені наступні дослідження.

Тонкий шар порошку вугілля забрудненого дріжджовими грибами (КУО/г –  $7,0 \cdot 10^3$ ) і плісневими грибами (КУО/г –  $1,0 \cdot 10^3$ ) опромінювали дозами УФ-С 300 Дж/м<sup>2</sup> та 1000 Дж/м<sup>2</sup>. В якості джерела УФ-випромінення використовували ртутну кварцеву лампу низького тиску потужністю 80 Вт (тип ZW80D19W) з густиною променевого потоку УФ-С - 240 Вт/см<sup>2</sup>.

Для забезпечення рівномірного опромінення поверхні досліджуваного порошку його здійснювали на алюмінієвій фользі з переміщуванням порошку за допомогою вібрації.

Результати аналізу після опромінення порошку дозою 300 Дж/м<sup>2</sup> для дріжджових грибів КУО/г –  $2,6 \cdot 10^3$ , для плісневих КУО/г –  $8 \cdot 10^2$ . При опроміненні дозою 1000 Дж/м<sup>2</sup> для дріжджових, відповідно КУО/г –  $2,2 \cdot 10^3$ , і

для плісневих КУО/г –  $7,2 \cdot 10^2$ . Сумарна кількість грибів при дозі  $300 \text{ Дж/м}^2$  складає  $34 \cdot 10^2$  КУО/г, а при дозі  $1000 \text{ Дж/м}^2$  –  $29,2 \cdot 10^2$ , тобто в першому випадку перевищуються в 34 рази, а в другому – в 29 разів.

Нами зроблено припущення, що частина поверхні порошку не отримує необхідної дози і потрібно знаходити шляхи більш ефективного опромінення. Для вирішення цієї задачі був використаний пристрій описаний в [195]. Порошок вугілля опромінювали в камері в процесі його вільного падіння під дією сили гравітації потоком УФ-С густиною приблизно  $500 \text{ Вт/см}^2$  та  $2000 \text{ Вт/см}^2$ . Кількість дріжджових грибів після опромінення потоком з густиною  $500 \text{ Вт/см}^2$  була  $21 \cdot 10^2$  КУО/г, а при опроміненні потоком з густиною приблизно  $2000 \text{ Вт/см}^2$  –  $12 \cdot 10^2$  КУО/г. Для плісневих грибів цифри, відповідно,  $11 \cdot 10^2$  та  $5,5 \cdot 10^2$  КУО/г. Сумарна кількість грибів при опроміненні навіть потоком великої густини ( $2000 \text{ Вт/см}^2$ ) становить  $16,5 \cdot 10^2$  КУО/г. Це дещо кращий результат, ніж для УФ-опромінення тонкого шару, але нормативних показників досягти не вдалося. Можна припустити що гриби знаходяться не тільки на поверхні і при поверхневому шарі, але і в товщі частинок порошку.

Отримані результати УФ-опромінення активованого вугілля показали значне зниження загальної ступені інактивації дріжджовими і пліснявими грибами (ТУМС).

Ефективність знезараження залежить від багатьох чинників: необхідної дози опромінення, а також від фізико-хімічних характеристик матеріалу, а саме: розміру і поверхні частинок, їх однорідності, а також їх прозорості для УФ-променів і т.д.

Враховуючи вище допустиме припущення, подальші дослідження були проведені з опроміненням тонкого шару вугілля забрудненого дріжджовими грибами ( $\text{КУО/г} = 9,5 \cdot 10^3$ ) і плісневими грибами ( $\text{КУО/г} = 1,0 \cdot 10^3$ ) в камері з використанням озонних ртутних кварцевих ламп низького тиску потужністю  $20 \text{ Вт}$  (тип ZW20D15Y). Результати аналізу після опромінення порошку дозою

1200 Дж/м<sup>2</sup> для дріжджових грибів КУО/г –  $0,45 \cdot 10^2$ , для плісневих КУО/г –  $0,3 \cdot 10^2$  (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2

Результати аналізу опромінення порошку вугілля в камері  
з використанням озонних ламп

№ п/п	Назва показника	НД на метод випробувань	Допустимі рівні	фактичне значення, КОЕ/г
1	Дріжджі, КОЕ в 1 г	Державна фармакопея України (Методика контролю якості)	Фактичне значення	$9,5 \cdot 10^3$
	Плісені, КОЕ в 1 г			$1,5 \cdot 10^3$
2	Дріжджі, КОЕ в 1 г			$9,2 \cdot 10^2$
	Плісені, КОЕ в 1 г			$6,0 \cdot 10^2$
3	Дріжджі, КОЕ в 1 г			$0,45 \cdot 10^2$
	Плісені, КОЕ в 1 г			$0,3 \cdot 10^2$

Сумарна кількість грибів при дозі 1200 Дж/м<sup>2</sup> складає  $0,75 \cdot 10^2$  КУО/г, що задовольняє вимогам нормативної документації [190].

## 5.2 Спосіб бактерицидного знезараження сипучих продуктів харчування

Проблема забезпечення тривалості зберігання харчових продуктів з високим і проміжним вмістом води без створення відповідних умов зберігання була і залишається однією з найважливіших завдань харчової промисловості.

Вода, перебуваючи в їжі у вільному і зв'язаному стані, є істотним чинником збереження водорозчинних вітамінів, запобігає окисленню жирів,

неферментативному потемнінню продукту. Але, в той же час, вона сприяє сприятливому розвитку патогенної мікрофлори, що викликає швидке псування продукту. У зв'язку з цим, проведення знезараження (стерилізації) в процесі виробництва є необхідною технологічною операцією для отримання продукту, безпечного в санітарно-гігієнічному відношенні.

В даний час існування різних методів і способів знезараження сипучих харчових продуктів і сировини для них дозволяють повною мірою досягти позитивних результатів при знищенні бактерій та іншої мікрофлори [5].

Найбільш поширеними є хімічні методи знезараження сипучих продуктів. Так, відомий спосіб знезараження сипучих продуктів, що передбачає дезінфікуючий вплив на оброблюваний продукт парами пропіонової кислоти при його переміщенні [196].

Недоліками цього технічного рішення, як і інших різновидів хімічних методів та способів для їх здійснення є те, що вплив будь-яких хімічних речовин на харчові продукти та інгредієнти різних препаратів потенційно небезпечний, оскільки при цьому можуть ініціюватися різні хімічні реакції, що призводять до зміни фізико-хімічних і біологічних властивостей оброблюваних продуктів. Оцінка реальної небезпеки такого роду змін надзвичайно важка і далеко не завжди достовірна. Залишкова кількість хімічного препарату в тому чи іншому вигляді потрапляє в кінцевий продукт. Хімічні препарати зазвичай володіють значною післядією. Крім того, більшість хімічних методів, селективні щодо природи і стану оброблюваного продукту, тобто для конкретного виду і стану продукту в загальному випадку необхідний підбір відповідного хімічного реагенту та режиму його застосування.

Таким чином, методи дезінфекції, які базуються на застосуванні хімічних дезінфікуючих реагентів (сильних окислювачів: озон, хлор) та радіаційні методи, які використовують різні іонізуючі випромінювання (рентгенівське, гамма-випромінювання) супроводжуються впливом на структуру, що призводить до незворотних змін фізико-хімічних властивостей і погіршують



біологічну цінність продукту [193].

Ефективний напрям вирішення існуючої проблеми – використання ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвиль 253,7 нм, що має бактерицидну дію і забезпечує ефективну інактивацію мікроорганізмів різних типів – бактерій, грибків та ін. [3, 8]. При ультрафіолетовому опроміненні твердих частинок обробляється тільки найтонший шар, основна ж маса речовини не піддається ніякому впливу і, відповідно, не змінює своїх біохімічних властивостей. Крім того, УФ-випромінювання на відміну від хімічного радіологічного знезараження не погіршує смакові властивості і біологічну цінність продуктів при перевищенні дози опромінення. У цьому й полягають переваги УФ-обробки в порівнянні з іншими методами знезараження [8].

Враховуючи факт непрозорості твердих середовищ, для УФ-випромінювання при обробці сипучих продуктів застосовують вібраційні або ротаційні апарати, які забезпечують перемішування частинок, піддаючи їх УФ-опромінюванню з усіх сторін. Застосування таких апаратів для забезпечення опромінювання всіх видимих для УФ-випромінювання поверхонь повинне супроводжуватися тривалим часом обробки для досягнення найбільшої ймовірності опромінення всієї поверхні частинок з необхідною для інактивації дозою та отримання оптимального результату.

Спроби створення ефективної технології дезінфекції сипучих харчових продуктів з використанням УФ-опромінення робили неодноразово, проте помітного позитивного прогресу (результату) не спостерігали.

Для вирішення поставленої задачі з метою досягнення позитивних результатів при опроміненні сипучих продуктів розглянемо ряд відомих технічних засобів аналогічного призначення, принцип роботи яких базується на використанні УФ-опромінення.

Відома установка для обробки сипучих продуктів опроміненням, в тому числі і УФ [197], що включає завантажувальний і розвантажувальні пристрої, а також камеру для опромінювання, що складається з верхнього та нижнього

барабанів, всередині яких встановлені джерела ІЧ- та УФ- випромінювань. Продукт подається в шнековий транспортер, який переміщує його вздовж барабана, що обертається. Усередині верхнього барабана встановлені ІЧ-лампи, що призначені для нагріву і сушіння продукту, після яких продукт потрапляє в нижній барабан. У нижньому барабані продукт опромінюється УФ-лампами в захисних чохлах, під дією яких відбувається його стерилізація.

Недоліком пристрою є розміщення джерел УФ-випромінювання, що не забезпечують опромінення продукту, який знаходиться у вигляді шару, що знижує проникнення УФ-випромінювання по всій глибині продукту і перешкоджає його всебічній обробці. Крім того, дана установка ускладнює технологічний процес за рахунок додаткової операції, яка включає розвантаження та пакування продукту. Остання операція не виключає ймовірності повторного забруднення оброблюваного продукту, оскільки включає розвантаження (пересипання) ще в одну ємність, а тільки після цього пакування.

Відома також установка для обробки сипучих продуктів опроміненням [198]. Установка включає завантажувальний і розвантажувальні пристрої, робочу камеру у вигляді похилого барабану, на стінках якого є виступи, що переміщують продукт. Усередині барабана встановлені касети з джерелами ІЧ- та УФ-випромінювань. У барабан за допомогою спеціального пристрою подається повітря, яке видаляє пил і сторонні включення методом аспірації. З пристрою завантажений продукт подається в барабан, де одночасно рухається в наповненій комірці вгору по напрямку обертання барабану і до розвантажувального пристрою. При переміщенні, частинки продукту перекочуються і в падінні повертаються різними сторонами у відношенні до джерел ІЧ та УФ-випромінювання. Час перебування продукту в зоні опромінення залежить від кута нахилу платформи.

Конструкція пристрою, передбачає пересипання і перемішування продукту, що дозволяє опромінювати частинки в падінні з усіх боків. Проте

угрупкування ламп в касети і їх розташування в центрі барабана не забезпечує з достатньою надійністю нормативної дози опромінення оброблюваного продукту. Це відбувається тому, що при падінні в барабані і проходженні зони опромінення частинки сипучої речовини рухаються нерівномірно. Зазначені особливості руху частинок оброблюваної речовини при розташуванні ламп у пристрої не враховувалися, тому за час проходження зони опромінення вони не отримували необхідної для знезараження УФ-дозы. Варіювання часом обробки тільки за рахунок нахилу барабана не може забезпечити необхідну дозу, так як при великому куті нахилу барабана швидкість падіння частинок збільшується, а при малих кутах продукт не буде перемішуватися і пересипатися з достатнім ступенем інтенсивності. За таких умов частина продукту, особливо на периферії барабана, не буде піддаватися взагалі опроміненню. Крім того, при розташуванні таким чином ламп створюються зони низької інтенсивності випромінювання, потрапляючи в які продукт також недостатньо опромінюється.

Мета запропонованого технічного рішення – позбавитись недоліків, які є у наведених вище аналогів і вирішити завдання бактерицидного знезараження сипучих харчових продуктів з розміром частинок  $1 \div 50$  мкм шляхом ультрафіолетового опромінення.

Для досягнення мети запропонований спосіб опромінення сипучих матеріалів [195, 199], який відрізняється тим, що опромінення сипучих харчових продуктів, наприклад, білкової маси з розміром частинок  $1 \div 50$  мкм здійснюється під час їх вільного падіння під дією сили тяжіння. Для забезпечення дози  $H$ , необхідної для інактивації мікроорганізмів, висота опромінювальної камери  $h$  і опроміненість на поверхні вільнопадаючих частинок  $E$  вибирається із умов:

$$H \leq K \cdot E \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (5.1)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/s^2$ ;  $E$  – опроміненість на поверхні частинок,  $Bm/m^2$ ;  $h$  – висота опромінювальної камери,  $m$ ;  $K$  – коефіцієнт запасу, який враховує зниження опромінювальності внутрішніх шарів вільнопадаючих частинок у результаті поглинання променевого потоку (з врахуванням багаторазових відбивань від поверхонь частинок у зовнішніх шарах).

Коефіцієнт запасу поглинання визначають експериментально для кожного продукту з врахуванням його гранулометричного складу, коефіцієнту відбивання поверхні УФ-області спектру, виду мікроорганізмів інактивацію яких необхідно проводити та густини вільнопадаючих частинок в опромінювальному стовпі. Коефіцієнт  $K$  для різних умов опромінення та продуктів може змінюватись від 1,2 до 3. Рівномірність і густина потоку падаючих частинок забезпечується шляхом дозованої подачі сипучої маси на сито і просіювання її над опромінювальною камерою.

Технічний результат запропонованого способу – підвищення ефективності бактерицидного знезараження сипучих харчових продуктів, досягається за рахунок наступних технологічних операцій: підготовка сипучого продукту – (дозування та розсівання на ситі), і опромінення в камері УФ-лампами низького тиску з необхідною бактерицидною дозою, яку визначають із умови (5.1).

Доза інактивації бактерій може варіюватися висотою камери  $h$ , величиною опроміненості  $E$  (кількістю бактерицидних ламп, їх потужністю та просторовим розміщенням у камері, коефіцієнтом відбивання поверхні камери) та густиною потоку вільнопадаючих частинок.

Спосіб бактерицидного знезараження сипучих харчових продуктів та режимів опромінення технічно реалізовано на установці УФ-знезараження білкової маси [194, 195].

Пристрій – камера у вигляді циліндра довжиною до 1,5 м, в якій рівномірно по периметру і відповідно по всій довжині розміщують газорозрядні УФ-лампи низького тиску. Над камерою знаходиться

завантажувальний бункер з якого подається продукт на сито. Вібросито, забезпечуючи попередній розсів, перешкоджає агрегуванню частинкам потрапляти в камеру опромінення, де під дією УФ-випромінювання проходить процес знезараження. Для ефективного розсіювання вологість продукту для знезараження не повинна бути вище ніж 6 %. Частинки в камері опромінення (прямокутний циліндр), після розсіювання, рухаються під дією вільного падіння. Після проходження камери опромінення об'єкт знезараження потрапляє відразу в ємність для пакування, щоб запобігти пересипанню та ймовірності появи спорових форм бактерій та мікрофлори.

Для забезпечення оптимізації технологічного процесу та досягнення поставленої мети нами проведені необхідні розрахунки бактерицидної дози опромінення в залежності від видів мікроорганізмів та їх чутливості до УФ-опромінювання, при цьому нами враховувались наступні параметри: розміри частинок і час перебування порошкової маси в камері опромінення.

Лінійні розміри частинок сипучого продукту, визначали за допомогою діоптрійної наводки окуляру 8 мікроскопу МБС-9. Підрахунки частинок проводили на 3-х полях розміром  $1 \text{ мм}^2$  в кількості не менше, ніж 300 шт. Для розрахунків використовували середнє значення отриманих розмірів.

Частинки, розмір яких не більше ніж декілька десятків мікрон, рухаються в камері опромінення під дією сили вільного падіння. Враховуючи розміри частинок і опір повітря в камері опромінення, проведені нами розрахунки показали, що в зоні обробки частинки порошкової маси перебувають не менше однієї секунди. Враховуючи час падіння частинок у камері, нами були проведені розрахунки необхідної мінімальної дози опроміненості (з врахуванням стійкості мікроорганізмів до УФ-випромінювання) [3]. Пропонують розміри камери установки вибирати із умов, при яких мінімальна опроміненість  $E_{\min}$  для найменш опромінювальних ділянок камери була б достатньою для створення поверхневої дози  $H_s$ , необхідної для інактивації мікроорганізмів [21, 200]. Інші ділянки будуть отримувати «надлишкове» опромінення, що тільки підвищує надійність знезараження. Важливим

чинником є те, що передозування при УФ-опромінюванні виключають [201].

У результаті опромінення з використанням описаного вище способу отримані наступні результати інактивації [195]: БГКП в 0,1 г продукту не виявлено, при нормуючому значенні – не допускається; МАФАНМ колоніє утворюючих одиниць (КУО) в 1 г продукту –  $3,5 \times 10^4$ , при нормуючому значенні –  $5,0 \times 10^4$  КУО/г.

Мікробіологічні дослідження підтвердили результати розрахунків та ефективність бактерицидного знезараження запропонованого способу.

## Висновки до розділу

1. Запропоновано спосіб бактерицидного знезараження вугілля активованого торгівельної марки «Сілкарбон» від дріжджових і плісневих грибів з використанням УФ-опромінення і озонування при їх комплексній дії.

2. При ультрафіолетовому опромінюванні вугілля активованого зараженого дріжджовими та плісневими грибами в області С при дозах в 1200 Дж/м<sup>2</sup> з використанням озонних ртутних кварцових ламп низького тиску вдається досягти сумарної кількості грибів  $0,75 \cdot 10^2$  КУО/г, що не перевищує нормованих показників.

3. Розроблена установка та спосіб опромінення сипучих матеріалів, який відрізняється тим, що опромінення сипучих харчових продуктів з розміром частинок 1÷50 мкм здійснюється під час їх вільного падіння під дією сили тяжіння.

4. Для забезпечення дози  $H$ , необхідної для інактивації мікроорганізмів, висота опромінювальної камери  $h$  і опроміненість на поверхні вільнопадаючих частинок  $E$  вибирається із умови:  $H \leq K \cdot E \sqrt{\frac{2h}{g}}$ .

5. Ефективність мікробіологічного очищення (знезараження) продуктів харчової промисловості з використанням ультрафіолетового опромінювання залежить від багатьох чинників: необхідної дози опромінення, фізико-хімічних характеристик матеріалу, прозорості частинок для УФ-променів і т.д.

## ВИСНОВКИ

1. Показана перспективність використання УФ-випромінювання в різних сучасних технологіях, зокрема для:

- 1) бактерицидного знезараження сипучих харчових продуктів;
- 2) мікробіологічного очищення активованого вугілля;
- 3) в передпосівній та в передпосадковій обробці насіння сільгоспкультур.

2. Представлена характеристика штучних джерел ультрафіолетового випромінювання: розрядні ртутні лампи низького та високого тиску, амальгамні, ксенонові, ексімерні, напівпровідникові та безелектродні лампи.

3. Вибрані методики та засоби вимірювання УФ-випромінювання для оцінювання параметрів ламп.

4. Запропонована методика контролю потоку випромінювання бактерицидних ламп низького тиску за спадом бактерицидного потоку.

5. Інтенсивність багатьох фізіологічних процесів, формування рослин і продуктивність культур істотно визначається довгохвильовим і середньохвильовим ультрафіолетом, частка якого не повинна перевищувати 3-4% від рівня ФАР.

6. УФ-С випромінювання позитивно впливає на ростові процеси насіння пшениці, ріпаку моркви та клубні картоплі в передпосівній та в передпосадковій обробці, оскільки збільшується енергія проростання, схожість та врожайність.

7. Розроблена технологія знезараження сипучих продуктів, суть якої в УФ-опроміненні частинок під час вільного падіння під дією сили тяжіння.

8. Запропоновано спосіб бактерицидного знезараження вугілля активованого від дріжджових і плісневих грибів з використанням УФ-опромінення і озонування при їх комплексній дії.

9. Визначені напрямки щодо подальших досліджень, зокрема:

- дослідження можливості використання УФ-випромінювання для



очищення води та інших об'єктів від токсичних речовин;

- дослідження ефективності використання високоінтенсивних УФ-джерел випромінювання (ртутних та металогалогенних розрядних ламп), ексимерних та світлодіодних ультрафіолетових ламп в різних технологічних процесах.

Дослідження будуть проводитися в науково-дослідній темі: «Розробка ультрафіолетових опромінювальних установок фотохімічної та фотобіологічної дії для знезараження рідин від небезпечних речовин та мікроорганізмів».

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Справочная книга по светотехнике : 3-е изд. переработ. и допол. / под ред. Ю. Б. Айзенберга. Москва : Знак, 2006. 972 с.
2. Рохлин Н. Г. Разрядные источники света. Москва. : Энергоиздат, 1991. 720 с.
3. Вассерман А. Л., Шандала М. Г., Юзбашев В. Г. Ультрафиолетовое излучение в профилактике инфекционных заболеваний. Москва : Медицина, 2003. 208 с.
4. Specials Lamps – Philips Lighting. URL: <http://www.lighting.philips.com/prof/conventional-lamps-and-tubes/special-lamps> (дата звернення: 09.04.15).
5. Сарычев Г. С. Облучательные светотехнические установки. Москва : Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
6. Попов О. А. Эффективный источник света на индуктивном бесферритном разряде на частотах 300-3000 кГц // Журнал теоретической физики. 2007. Т. 77. Вып. 6. С. 74-81.
7. Лампы для облучателей: ИК, УФ, бактерицидные Osram [Электронный ресурс] / Каталог ламп Osram. URL: [http://www.osramlampa.ru/index.php?id\\_group=165&do=show\\_group/](http://www.osramlampa.ru/index.php?id_group=165&do=show_group/) (дата звернення: 09.01.17).
8. Ультрафиолетовые технологии в современном мире : коллективная монография / Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С. В. Долгопрудный: Из-во Дом «Интеллект», 2012. 392 с.
9. Влияние пускового режима на срок службы электродов мощных амальгамных ламп низкого давления / А. И. Васильев, Л. М. Василяк, С. С. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, Д. В. Соколов, А.Ю. Старцев // Светотехника. 2009. № 1. С. 4–9.

10. Характеристики излучения импульсного разряда в ксеноне / Д. В. Рыбка, Е. Х. Бакшт, М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко, М. Кришнан, Дж. Томпсон // Журнал технической физики. 2005. Т.75. Вып. 2. С. 131–134.
11. Development and applications of UV excimer lamps. In book «Photo-Excited Processes, Diagnostic and Applications» / U. Kogelschatz, I. W. Boid, J. Y. Zhang // Kluwer Academic Publishers. 2003. P. 161–199.
12. Соснин Э. Л. Эксилампы и новое семейство газоразрядных ультрафиолетовых облучателей на их основе // Светотехника. 2006. № 6. С. 25–31.
13. Эксилампы — эффективные источники УФ- и ВУФ-излучения / Ломаев М. И., Скакун В. С., Соснин Э. Л., Тарасенко В. Ф., Шитц Д. В., Ерофеев М. В. // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
14. Шуаибов А. К. Шимон Л. Л., Шевера И. В. Многоволновая электроразрядная лампа на галогенидах инертных газов // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 3. С. 142–144.
15. Мак-Каскер М. Эксимеры инертных газов. Эксимерные лазеры / под ред. Ч. Роудза. Москва : Мир. 1981. С. 70–117.
16. Ультрафиолетовый излучающий диод / Удальцов В. Е., Желаннов А. В., Титова А. А., Панов Н. А. // Вестник новгородского государственного университета. 2011. № 65. С. 38–40.
17. Мощные ультрафиолетовые излучающие диоды / Н. А. Гальчина и др. // Светотехника. 2010. № 3. С. 35–37.
18. Electronic Components Datasheet Search. URL: <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Uvtop270> (дата звернення: 17.01.18).
19. ГОСТ 17616-82 (СТ СЭВ 3180-81). Лампы Электрические. Методы измерения электрических и световых параметров [Чинний від 1983-01-01]. Москва : Издательство стандартов, 1982. – 41 с. – (Міждержавний стандарт).

20. Proposed Method for measurement of Output of Monochromatic (254 nm) Low Pressure UV Lamps / Lawal O. et al // IUVA News. 2008. Vol. 19. № 1. P. 10–16.
21. Методика измерения потока УФ излучения трубчатых бактерицидных ламп НД / Л. М. Василяк и др. // Светотехника. 2011. № 1. С. 29–32.
22. Белявский М. П., Вассерман А. Л., Рубинштейн П. В. Методика контроля потока излучения бактерицидных ламп в процессе их эксплуатации. // Светотехника. 2001. № 1. С. 6–8.
23. Адлер Ю. П., Маркова Е. Б., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 279 с.
24. Бейли Н. Статистические методы в биологии. Москва : Мир, 1964. 289 с.
25. Лебедев В. В. Руководство по обработке результатов наблюдений при выполнении лабораторных работ. Москва : МИНГ, 1987. 175 с.
26. Nelson L. S. Standardizing Students // The Aruevicou Statisticou. 1973. № 27. P. 93.
27. Причины проявления «тусклых» энергоэкономичных люминесцентных ламп и рекомендации по их устранению / Мещеряков Ю. А. и др. Труды ВНИИИС : Расчет параметров и конструирование источников света. Саранск, 1989. Вып. 21. С. 61–72.
28. Модулі світлодіодні загального освітлення - Вимоги щодо характеристик – LED modules for general lighting – Performance requirements [Електронний ресурс] : IEC/PAS 62717:2011. – URL. : [webstore.iec.ch/publication/20755](http://webstore.iec.ch/publication/20755). – (оприлюднені технічні умови МЕК).
29. Мальков М. Спад светового потока светодиодных сборок и долгосрочное прогнозирование их срока службы // Lumen & expertunion. 2012. С. 123–136.
30. Кожушко Г. М. Басова Ю. О., Давиденко В. І. Прогнозування строку служби СВД-ламп за спадом світлового потоку // Науковий вісник

Полтавського університету економіки і торгівлі. Сер. Технічні науки. Полтава: ПУЕТ, 2013. № 1(57). С. 8–11.

31. Джерела ультрафіолетового випромінювання. Методика виконання вимірювань параметрів ультрафіолетового випромінювання. МВУ 11-038-2007, від 1 квітня 2007р.

32. Анализ современных промышленных источников бактерицидного ультрафиолетового излучения / Васильев А. И., Красночуб А. В., Кузьменко М. Е., Петренко Ю. П., Печеркин В. Я. // Светотехника. 2004. № 6. С. 42–45.

33. Jinno M. Motomura H., Ikeda Y., Aono M. Fundamental Research on Xenon and Xenon-Rare Gas Pulsed Dielectric Barrier Discharge Fluorescent Lamps. Proc. of the XXVI ICPIG 2003. Greifswald. Germany (July 2003). P. 320-321.

34. Wekhof A. Trompeter F-J. Franken O. Pulsed UV Disintegration (PUVD): a new sterilization mechanism for packing and broad medical-hospital application. The First International Conference on Ultraviolet Technologies, June 14-16, 2001. Washington, USA.

35. Wekhof A. Disinfection with flash lamps. PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology. 2000. Vol. 54. P.264–267.

36. Камруков А. С., Козлов Н. П., Шашковский С. Г., Яловик М. С. Новые биоцидные ультрафиолетовые технологии и аппараты для санитарии, микробиологии и медицины // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 1. С. 32–40.

37. Inactivation differences of microorganisms by low pressure UV and pulsed xenon lamps / Otaki M. et al. // Water Sci. Technol. 2003. Vol. 47. № 3. P. 185–190.

38. Wang T., Macgregor S. J., Anderson J. G., Woolsey G. A Pulsed ultraviolet inactivation spectrum of Escherichia coli // Water Res. 2005. Vol. 39. P. 2921–2925.

39. Method of sterilization : patent 4464336, USA : A61L2/10. 15.05.1980; 07.08.1984. Hiramoto, 1984.

40. Василяк Л. М. Применение импульсных электроразрядных ламп для бактерицидной обработки // Электронная обработка материалов. 2009. № 1. С. 30–40.
41. Lagunas-Solar Manuel C., Pina C., Bolkan L., MacDonald D. James. Development of Pulsed UV Light Processes for Surface Fungal Disinfection of Fresh Fruits // Journal of Food Protection. 2006. Vol. 69. № 2. P. 376–384.
42. A comparison of pulsed and continuous ultraviolet light sources for the decontamination of surfaces / K. F. McDonald et al // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. Vol. 28. Issue 5. P.1581–1587.
43. Inactivation of Food-Borne Enteropathogenic Bacteria and Spoilage Fungi Using Pulsed-Light / Anderson J. G. et al // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2000. Vol. 28. №. 1. P. 83–88.
44. Газалов В. С., Пономарева Н. Е. Влияние режимов предпосевной обработки ультрафиолетовым излучением на схожесть озимой пшеницы // Электротехнологии и электрооборудование в с/х производстве. зерноград, 2004. Вып. 4. Т.1. С. 46–49.
45. Газалов В. С., Пономарева Н. Е. Эффективность источников инфракрасного излучения в предпосевной обработке семян // Электротехнологии и электрооборудование в с/х производстве. зерноград, 2005. Вып. 5. Т.1. С. 15–18.
46. УФ-В радіація і рослини: механізми ушкодження та захисту / Гродзинський Д. М. та ін. – К. : Фітосоціоцентр, 2007. 152 с.
47. Тихомиров А. А. Шарупич В. П., Лисовский Г. М. Светокультура растений. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской Академии Наук, 2000. 213 с.
48. Самойлова К. А. Клеточные и молекулярные механизмы биологических эффектов УФ-излучения. Киев : Наук. думка, 1982. 246 с.
49. Червінський Л. С. Романенко О. І. Вимоги до спектрального складу штучних джерел оптичного випромінювання для вирощування рослин у спорудах закритого ґрунту // Науковий вісник Національного університету

біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК. 2016. № 3. С. 88–95.

50. Голубкина Н. А., Добровольский М. В., Прикупец Л. Б., Протасова Н. Н. О влиянии дополнительного ультрафиолетового облучения на продуктивность и пищевую ценность овощей в условиях защищенного грунта. // Светотехника. 1994. № 6. С. 2–5.

51. Yemelin A. A. Prikupets L. B., Tarakanov I. G. Spectral Aspect when Using Light-Emitting Diode Irradiators for Salad Plant Cultivation under Photoculture Conditions // Light & Engineering. 2015. Vol. 23. № 4. P. 55–62.

52. Plant response to solar ultraviolet radiation // Encyclopedia of Plant Physiology / Caldwell M. M. et al. Berlin : Springer-Verlag, 1981. V. 12A. P. 169–197.

53. Стрижовский А. Д. Влияние ультрафиолетовой радиации повышенной интенсивности на растения: вероятные последствия разрушения стратосферного озона // Радиационная биология. Радиоэкология. 1999. № 6. С. 683–691.

54. Коновалова И. О. Определение оптимальных параметров светодиодного освещения листовых овощных культур применительно к витаминной космической оранжерее : авторефер. дис. кандидата биологических наук : 14.03.08, 03.01.06. Москва, 2016. – 24 с.

55. Kakani V. G., Reddy K. R., Zhao D., Salaja K. Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review. Agricultural and Forest Meteorology. 2003. Vol. 120. С. 191–218.

56. Курочкина О. А. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы ультрафиолетовыми лучами : дис. кандидата сельскохозяйственных наук : 06.01.09 . Курган, 2009. 124 с.

57. Юрина Н. П., Мокерова Д. В., Одинцова М. С. Светоиндуцируемые стрессовые белки пластид фототрофов // Физиология растений. 2013. Т. 60. № 5. С. 611–624 .

58. Heijde M. Ulm R UV-B photoreceptor-mediated signalling in plants // Trends Plant Sci. Vol. 17. Issue 4. P. 230–237.
59. Головацкая И. Ф. Морфогенез растений и его регуляция. Часть 1: Фоторегуляция морфогенеза растений : учеб. пособие. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 172 с.
60. Фрайкин Г. Я. Фоторецепторы светорегулируемых биологических процессов // Альманах мировой науки. 2016. № 1-1 (4). С. 30–32.
61. Somers D. E., Devlin P. F., Kay S. A. Phytochromes and cryptochromes in the entrainment of the Arabidopsis circadian clock // Science. 1998. Vol. 282. P. 1488–1490.
62. Antagonistic actions of Arabidopsis cryptochromes and phytochrome B in the regulation of floral induction / Mockler T. C. et al // Development. 1999. Vol. 126. P. 2073–2082.
63. Cashmore A. R., Jarillo J. A., Wu Y.-J., Liu D. Cryptochromes: blue light receptors for plants and animals // Science. 1999. Vol. 284. P. 760–765.
64. Devlin P. F., Kay S. A. Cryptochromes are required for phytochrome signaling to the circadian clock but not for rhythmicity // Plant Cell. 2000. Vol. 12. P. 2499–2510.
65. Mazzella M. A., Cerdan P. D., Staneloni R. J., Casal J. J. Hierarchical coupling of phytochromes and cryptochromes reconciles stability and light modulation of Arabidopsis development // Development. 2001. Vol. 128. P. 2291–2299.
66. Yanovsky M. J., Kay S. A. Living by the calendar: how plants know when to flower // Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 2003. Vol. 4. P. 265–275.
67. Casal J., Yanovsky M. Regulation of gene expression by light // Int. J. Dev. Biol. 2005. Vol. 49. P. 501–511.
68. Genome-wide gene expression analysis reveals a critical role for Cryptochrome1 in the response of Arabidopsis to high irradiance / Kleine T. et al // Plant Physiol. 2007. Vol. 127. P. 1391–1406.



69. Goh C. H. Phototropins and chloroplast activity in plant blue light signaling // *Plant Signal Behav.* 2009. Vol. 4. P. 693–695.
70. Cashmore A. R. Cryptochromes: enabling plants and animals to determine circadian time // *Cell.* 2003. Vol. 114. P. 537–543.
71. LOV (light, oxygen, or voltage) domains of the blue-light photoreceptor phototropin (nph1): Binding sites for the chromophore flavin mononucleotide / Christie J. M. et al // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1999. Vol. 96. P. 8779–8783.
72. Cryptochrome as a sensor of the blue/green ratio of natural radiation in *Arabidopsis* / Sellaro P. et al // *Plant Physiol.* 2010. Vol. 154. P. 401–409.
73. Light signaling and plant responses to blue and UV radiations–Perspectives for applications in horticulture / Huché-Thélier L. et al // *Environ. Exp. Bot.* 2016. Vol.121. P.22–38.
74. Devlin P., Christie J., Terry M. Introduction to photomorphogenesis: Many hands make light work // *Journal of Experimental Botany.* 2007. Vol. 58. № 12. P. 3071–3077.
75. Christie J. M. Phototropin blue-light receptors // *Annual Review of Plant Biology.* 2007. Vol. 58. P. 21–45.
76. Christie J. M., Briggs W. R. Blue light sensing in higher plants // *The Journal of Biological Chemistry.* 2001. Vol. 276. № 15. P. 11457–11460.
77. Blue light-induced autophosphorylation of phototropin is a primary step for signaling / Inoue S. et al // *PNAS.* 2008. Vol. 105. № 14. P. 5626–5631.
78. In vivo phosphorylation site mapping and functional characterization of *Arabidopsis* phototropin / Sullivan S. et al // *Molecular Plant.* 2008. Vol. 1. № 1. P. 178–194.
79. Sakamoto K., Briggs W. R. Cellular and subcellular localization of phototropin 1 // *The Plant Cell.* 2002. Vol. 14. P. 1723– 1735.
80. Bae G., Choi G. Decoding of light signals by plant phytochromes and their interacting proteins // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2008. Vol. 59. P. 281–311.

81. Structural basis of ultraviolet-B perception by UVR8 / Wu D. et al // Nature. 2012. Vol. 484. № 7393. P. 214–219.
82. Devlin P. F., Yanovsky M. J., Kay S. A. A genomic analysis of the shade avoidance response in Arabidopsis // Plant Physiol. 2003. Vol. 133. P. 1617–1629.
83. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in Lactuca sativa / Theoharis Ouzounis et al // Frontiers in Plant Science Crop Science and Horticulture February. 2015. Vol. 6. Article № 19.
84. Ito S., Song Y. H., Imaizumi T. LOV domain-containing F-box proteins: light-dependent protein degradation modules in Arabidopsis // Mol. Plant. 2012. Vol. 5. P. 573–582.
85. Fraikin G. Ya., Strakhovskaya M. G., Rubin A. B. Biological photoreceptors of light-dependent regulatory processes // Biochemistry (Mosc.). 2013. Vol. 78. P. 1238–1253.
86. Perception of UV-B by the Arabidopsis UVR8 protein / Rizzini L et al // Science. 2011. Vol. 332. P. 103–106.
87. Wu M., Grahn E., Eriksson L. A., Strid A. Computational evidence for the role of Arabidopsis thaliana UVR8 as UV-B photoreceptor and identification of its chromophore amino acids // J. Chem. Inf. Model. 2011. Vol. 51. P. 1287–1295.
88. Brown B. A., Headland L. R., Jenkins G. I. UV-B Action Spectrum for UVR8-Mediated HY5 Transcript Accumulation in Arabidopsis // Photochem. Photobiol. 2009. Vol. 85: 1147–1155.
89. Kliebenstein D. J., Lim J. E., Landry L. G., Last R. L. Arabidopsis UVR8 regulates ultraviolet-B signal transduction and tolerance and contains sequence similarity to human regulator of chromatin condensation 1 // Plant Physiology. 2002. Vol. 130. № 1. P. 234–243.
90. Plant UVR8 Photoreceptor Senses UV-B by Tryptophan-Mediated Disruption of Cross-Dimer Salt Bridges / Christie J. M. et al // Science. 2012. Vol. 335. № 6075. P. 1492–1496.

91. Cloix C., Jenkins G. I. Interaction of the Arabidopsis UV-B-specific signaling component UVR8 with chromatin // *Molecular Plant*. 2008. Vol. 1. № 1. P. 118–128.
92. Буглак А. А. Фотобиохимия птериновых коферментов : дис. на соискание ученой степени кандидата химических наук : 03.01.04. Москва, 2016. 118 с.
93. Chalker-Scott L. Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses // *Photochem. Photobiol.* 1999. Vol. 70. P. 1–9.
94. Tevini M., Iwanzik U., Thoma Wm. Some effects of enhanced UV-B irradiation on the growth and composition of plants // *Planta*. 1981. Vol. 153. P. 388–394.
95. Beggs C., Wellman E. Analysis of light-controlled anthocyanin formation in coleoptiles of *Zea mays* L.: The role of UV-B, blue, red and far-red light // *Photochem. Photobiol.* 1985. Vol. 41. P. 481–486.
96. Paul N. D., Moore J. M., Huey M. The potential benefits of three modified plastic crop covers in Hardy Ornamental Nursery Stock production: initial investigations on a grower holding (Garden Centre Plants, Preston) // *HDC Project CP*. 2006. № 19a. P. 29.
97. Photobiological properties of the inhibition of etiolated Arabidopsis seedling growth by ultraviolet-B irradiation / Gardner G. et al // *Plant, Cell Environ.* 2009. 32. P. 1573–1583.
98. Wargent J. J., Moore J. P., Ennos A. R, Paul N. D. Ultraviolet Radiation as a Limiting Factor in Leaf Expansion and Development // *Photochemistry and Photobiology*. 2009. Vol. 85. P. 279–286.
99. Jordan B. R. The effect of ultraviolet-B radiation on plants: a molecular perspective // *Adv. Bot. Res.* 1996. Vol. 122. P. 97–162.
100. Brandle J. R., Campbell W. F., Sisson W. B., Caldwell M. M. Net photosynthesis, electron transport capacity, and ultrastructure of *pisum sativum* l. exposed to Ultraviolet-B Radiation // *Plant Physiol.* 1977. Vol. 60. № 1. P. 165–169.

101. Канаш Е. В. Влияние УФ-Б радиации на агроэко-системы // Докл. РАСХН. 2002. № 3. С. 17–20.
102. Musil C. F. Accumulated effect of elevated ultraviolet-B radiation over multiple generations of the arid environment annual *Dimorphotheca sinuata* DC. (Asteraceae) // Plant, Cell Environment. 1996. 19. P. 1017–1027.
103. Акназаров О. Действие ультрафиолетовой радиации на рост, морфогенез и уровень гормонов высокогорных растений : дис. д-ра биол.наук. : 03.00.12. Душанбе, 1991. 329 с.
104. Competition, morphology and canopy structure in wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena fatua* L.) exposed to enhanced ultraviolet-B radiation / Barnes P. W. et al // Funct. Ecol. 1988. Vol. 2. P. 319–330.
105. Soybean (*Glycine max*) pollen germination characteristics, flower and pollen morphology in response to enhanced ultraviolet-B radiation / Koti S. et al // Ann. Bot. 2004. Vol. 94. № 6. P. 855–864.
106. Кравец Е. А., Гродзинский Д. М., Гуца Н. И. Влияние УФБ облучения на репродуктивную функцию растений *Hordeum vulgare* L // Цитология и генетика. 2008. № 5. С. 9–15.
107. Кравец Е. А. Клеточные и тканевые механизмы восстановительных процессов у *Hordeum distichum* L. при воздействии облучения // Цитология и генетика. 2009. Т. 43. № 1. С. 11–22.
108. Дмитрієв О. П., Поляковський С. О. УФ-В радиация и растения // Вестник Харьковского национального аграрного университета. 2007. № 1(10). С. 7–23.
109. Минич А. С. Экологические и морфофизиологические особенности продуктивности растений под флуоресцентными пленками : диссертация доктора биологических наук : 03.02.08. Томск, 2011. 279 с.
110. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Ультрафиолетовое излучение. Официальный научный обзор по воздействию УФ излучения на окружающую среду и состояние здоровья с упоминанием о

глобальном истощении озонового слоя // Всемирная организация здравоохранения. Женева. 1995. 414 с.

111. Берестяна А. М. Особливості природного та радіаційно-індукованого старіння монокарпічних рослин // Науковий вісник Ужгородського університету: Сер. «Біологія». Вип. 34. 2013. С. 11–21.

112. Ермаков Е. И., Канаш Е. В. Современные проблемы УФ-В радиации в экофизиологии и растениеводстве // С.-х. биология. 2005. № 1. С. 3–19.

113. Берестяна А. М. Епігенетичні аспекти радіаційного старіння рослин : дис. канд. біол. наук : 03.00.01 / НАН України, ін-т клітин. біології та генет. інженерії. Київ, 2015. 250 с.

114. UV-Induced Cell Death in Plants / Nawkar G. M., Maibam P., Park L. H., et al // International Journal of Molecular Sciences. 2013. Vol. 14. № 1. P. 1608–1628.

115. Campi M., Andrea L., Emiliani J. Participation of Chromatin Remodeling Proteins in the Repair of Ultraviolet-B-Damaged DNA // Plant Physiol. 2012. 158. P. 981–995.

116. UV-B Radiation Impacts Shoot Tissue Pigment Composition in *Allium fistulosum* L. Cultigens / Abney K. R., et al // Scientific World Journal. 2013. Vol. 201. P. 1–10.

117. Sensing of UV-B radiation by plants / Jiang L. et al // Plant Signal Behav. 2012. Vol. 7. № 8. P. 999–1003.

118. Fortunati A., Tassone P., Damasso M. Neutron irradiation affects the expression of genes involved in the response to auxin, senescence and oxidative stress in *Arabidopsis* // Plant Signal Behav. 2010. Vol. 5. № 8. P. 959–967.

119. Ultraviolet-B Radiation (UV-B) Relieves Chilling-Light-Induced PSI Photoinhibition And Accelerates The Recovery Of CO<sub>2</sub> Assimilation In Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Leaves / Zi-Shan Zhang et al // Sci. Rep. 2016. Vol. 6:34455.

120. Orth A. B., Teramum A. H., Sisler H. D. Effects of UV-B radiation on fungal disease development in *Cucumis sativus* // *Am J. Bot.* 1990. Vol. 77. P. 1188–1192.
121. Коломиец К. Д. Биосинтез белков и радиационные эффекты в клетке. Киев : Наукова думка, 1982. – 182 с.
122. Берестяна А. М. Зміни рибонуклеазної активності опромінених УФ-В та рентгенівською радіацією сім'ядольних листків *Linum usitatissimum* у процесі старіння // *Доповіді Національної академії наук.* 2014. № 12. С. 142–151.
123. Тараканов И. Г., Яковлева О. С. Влияние красного света разных спектральных диапазонов на физиологические особенности и продуктивность растений базилика эвгенольного (*Ocimum gratissimum* L.) // *Доклады ТСХА.* 2011. Вып. 283(1). С. 227–230.
124. Dunaeva M., Adamska I. Identification of genes expressed in response to light stress in leaves of *Arabidopsis thaliana* using RNA differential display // *Eur. J. Biochem.* 2001. Vol. 268. P. 5521–5529.
125. Асоціація світлоіндуцируемых стрессовых белков HLIA/HLIB с тримерами и мономерами фотосистемы 1 в клетках цианобактерии *Synechocystis* PCC / Акулинка Д. В // *Биохимия.* 2015. Т. 80 (10). С. 1522-1531.
126. От оборонных разработок к экологически чистым технологиям для сельского хозяйства / Зейналов А. А. и др. Высокие технологии XXI века : 5-й Международный форум. (Москва, 19-23 апреля 2004 г.). Секция: «Перспективы реализации высокотехнологических проектов в областях медицины и биотехнологии». Тезисы доклада. URL: <http://www.hitechno.ru/?page=archive01> (дата звернення: 21.12.2017).
127. Караев М. К., Абдулаев Х. М., Исаев З. А., Савина В. И. Применение люминесцентного спектрального анализа для сортировки картофеля и влияние УФ облучения на сроки его хранения. Сборник научных трудов Международной научно-практической «Инновационное развитие

аграрной науки и образования», 23.12.2015 г. Махачкала, 2016. Т. 2. С. 147–152.

128. Кондратьева Н. П., Краснолуцкая М. Г., Большин Р. Г. УФ светодиодная облучательная установка для обработки семян перед посевом // Агротехника и энергообеспечение. 2016. № 4 (13). Т.1. С. 22–31.

129. Одилбеков К. Влияние предпосевной обработки семян УФ-лучами разной длины волны на ростовые процессы, уровень гормонов и продуктивность растений // Докл. Академии наук республ. Таджикистан, 2007. Т. 50. № 2. С. 165–171.

130. Одилбеков К. Влияние предпосевной обработки семян УФ-светом разной длины волн на активность комплекса фитогормонов в листьях конских бобов // Докл. Академии наук республ. Таджикистан, 2013. Т. 56. № 10. С. 827–831.

131. Сафаралихонов А. Б., Худоербеков Ф. Н. Влияние предпосевного УФ-облучения семян растений пшеницы на их последующий рост и интенсивность транспирации листьев // Докл. Академии наук республ. Таджикистан, 2016. Т. 59. № 7–8. С. 344–348.

132. Семенов А. О., Сахно Т. В., Кожушко Г. М. Аналіз ролі УФ-випромінювання на розвиток і продуктивність різних культур // Світлотехніка та електроенергетика. 2017. № 2. С. 3–16.

133. Тихонов А. В., Тихонов В. Н., Иванов И. А., Еникеева Т. Ф. Действие гамма, УФ- и СВЧ-облучения на клубни картофеля // Современная техника и технологии. 2016. № 11. Ч.1. URL: <http://technology.snauka.ru/2016/11/11072> (дата звернення: 15.12.2017).

134. Jakubowski T., Pytlowski T. Impact of UV-C radiation on the infestation degree of the stored potato tubers with rhizoctonia solani Kuhn // Agricultural engineering. 2015. Vol. 2 (154). P. 35–43.

135. Rupiasih N. Nyoman. Effect of UV-C radiation and hypergravity on germination, growth and content chlorophyll of wheat seedlings // AIP Conference Proceeding. 2016. Vol. 1719(1). P. 030035–030035.6.

136. Савельев В. А. Обработка семян пшеницы ультрафиолетовыми лучами // Вестник с/х науки. 1990. № 3. С. 133–135.
137. Серегина М. Г. Предпосевное облучение семян повышает урожайность // Кормопроизводство. 1984. № 4. С. 27–28.
138. Рогожин В. В., Курилюк Т. Т. Влияние ультрафиолетового облучения семян на процессы перекисного окисления липидов в проростках пшеницы // Известия ТСХА. 1997. № 3. С. 116–131.
139. Рогожин В. В., Курилюк Т. Т. Влияние малых доз ультрафиолетового облучения семян на состояние антиоксидантной системы, прорастающих зерен пшеницы // Известия ТСХА. 1999. № 3. С. 105–124.
140. Семенов А. О., Кожушко Г. М., Сахно Т. В. Вплив передпосадкового УФ-опромінення на розвиток і продуктивність картоплі // Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2018. № 1 (88). С. 18–23.
141. Дослідження та розробка вдосконалених конструкцій ультрафіолетових джерел випромінювання для установок фотохімічної і фотобіологічної дії : звіт про НДР (заключ.) : № 1 від 01 січня 2011 р. / ВНЗ Укоопспілки "Полтавський університет економіки і торгівлі" ; кер. Кожушко Г. М. ; виконав. : Семенов А. О. [та ін.]. Полтава, 2015. 306 с. № ДР 0112U007433. Інв. № 0715U003750.
142. Семенов А. О., Кожушко Г. М., Баля Л. В. Безозонні бактерицидні лампи для установок фотохімічної і фотобіологічної дії // Технологический аудит и резервы производства. 2015. № 4/1 (24). С. 4–7.
143. Кононенко А. Н. Влияние различных источников света на развитие мини-растений картофеля в условиях светокультуры // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. № 45. С. 50–56.
144. Семенов А. О., Кожушко Г. М., Сахно Т. В. Ефективність проростання насіння ріпаку при передпосівному опроміненні його УФ-випромінюванням різного спектрального складу. Вісник полтавської державної аграрної академії. 2018. № 3 (90). С. 27–31.



145. Быстрые и надежные тест-наборы для выявления ГМО. Romer Labs. URL: <https://www.romerlabs.com/ru/produkty/test-nabory/gmo> (дата звернення: 21.02.18).

146. Rules for sampling, Analysis instructions, Methods of analysis and certification : Sampling Rules No.124 (Incorporating the Methods of Analysis Form No. 130) – [Entered 01.04.2012]. GAFTA (THE GRAIN AND FEED TRADE ASSOCIATION 9 LINCOLN'S INN FIELDS, LONDON WC2A 3BP). – 18 p.

147. Торф'яні субстрати. ПП Кардаш. URL: [http://kardash.com.ua/produkty\\_ua\\_universal.htm](http://kardash.com.ua/produkty_ua_universal.htm) (дата звернення: 13.12.17).

148. Антоненко О. Ф., Савчук Ю. М. Вплив строків сівби та мікродобрив на розвиток рослин ріпаку озимого в умовах правобережного лісостепу України // Вісник ЖНАЕУ. 2016. № 1 (53). Т.1. С. 87–94.

149. Кукса Ю.А., Комарова І. Б. Залежність урожайності ріпаку ярого від норм висіву, строків і способів сівби в умовах Північного Степу // Вісник аграрної науки. 2017. № 8. С. 32–36.

150. Лавриненко Ю. О., Влашук А. М., Шапарь Л. В. Вплив структурних показників на урожайність насіння ріпаку озимого залежно від строків сівби та норм висіву в Південному Степу України. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. № 5. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd\\_2016\\_5\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2016_5_16).

151. Сафаралихонов А. Б. Действие экологических факторов высокогорья и ультрафиолетового облучения семян на рост, транспирацию и активность эндогенных регуляторов роста растений : дис. канд. биолог. наук : 03.02.08. Душанбе, 2018. 134 с.

152. Moderate UV-A supplementation benefits tomato seed and seedling invigoration: a contribution to the use of UV in seed technology / N. Mariz-Ponte et al // Scientia Horticulturae. 2018. Vol. 235. P. 357–366.

153. Neelamegam R., Sutha T. UV-C Irradiation Effect on Seed Germination, Seedling Growth and Productivity of Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) // Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 2015. № 4 (8). P. 430–443.

154. Исаев А. В., Бастрон А. В., Яхонтова В. С. Исследование влияния степени неравномерности нагрева семян рапса в ЭМП СВЧ на их энергию прорастания и всхожесть // Вестн. КрасГАУ. 2016. № 4. С. 131–137.
155. Abdul Majeed, Zahir Muhammad, Rehman Ullah, Hazrat Ali. Gamma irradiation i: effect on germination and general growth characteristics of plants—a review // Pak. J. Bot. 2018. 50(6). P. 2449-2453.
156. Усенко С. М., Науменко О. В. Розрядні процеси в зерновій масі під дією сильного електричного поля імпульсного струму // Енергетика і автоматика. 2017. № 2. С. 108–115.
157. Бобрышев Ф. И., Редькин В. М., Стародубцева Г. П., Габриелян Ш. Ж. Влияние магнитных полей на посевные качества семян и продуктивность зерновых культур // Сб. науч. тр.: Пути повышения урожайности с.-х. культур. Ставрополь: Ставропольская ГСХА. 1995. С. 33–36.
158. De Souza A. Sueiro L., Gilart F. Improvement of the seed germination, growth and yield of onion plants by extremely low frequencynon-uniform magnetic fields // Scientia Horticulturae. 2014. Vol.176. P.63-69.
159. Перовський О. М. Технологія передпосівної стимуляції насіння високочастотним електромагнітним полем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 6/5. С. 45-50.
160. Компактная светодиодная ультрафиолетовая облучательная установка для предпосевной обработки семян хвойных растений / Кондратьева Н. П. и др // Вестник ВИЭСХ. 2017. № 2 (27). С. 62–69.
161. Sugimoto K. Seed germination under UV-B irradiation. Bull. Minamikyushu Univ. 2013. Vol. 43. A: 1–9.
162. Liua Bing, Xiao-bing Liua, Yan-Sheng Lia, S. J. Herbertca. Effects of enhanced UV-B radiation on seed growth characteristic sand yield components in soybean Field // Crops Research. 2013. Vol. 154. P.158–163.

163. Rajendiran K. Thiruvvarasan K., Vijayalakshmi R. In vitro seed germination and Growth of Three Varieties of Black Gram after Ultraviolet-B Radiation // *Int J Appl Sci Biotechnol.* 2016. Vol. 4(1). P.117–129.
164. ГОСТ 10968-1988. Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания. [Действителен от 1988-07-01]. Москва, Стандартинформ, 2009. 4 с. – (Межгосударственный стандарт).
165. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. Київ, 2003. 173 с. (Інформація та документація).
166. Алтухов И. В., Федотов В. А., Очиров В. Д. Изменение основных качественных показателей семян пшеницы после воздействия различными облучателями // *Вестник ИрГСХА: сборник научных трудов.* Иркутск : ИрГСХА, 2010. Вып. 40. С. 107–115.
167. Посевные качества семян мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при разных режимах воздействия низкочастотным электромагнитным полем / Левина Н. С. и др // *Сельскохозяйственная биология.* 2017. Т. 52. № 3. С. 580–587.
168. Маренич М. М., Юрченко С. О. Вплив допосівної обробки насіння біологічно активними речовинами на ріст і розвиток рослин пшениці озимої на початкових стадіях // *Вісник Полтавської державної аграрної академії.* 2017. № 1–2. С. 38–42.
169. Physical Methods for Seed Invigoration: Advantages and Challenges in Seed Technology / Araújo S. S. et al // *Front. Plant Sci.* 2016. Vol. 7. P. 646.
170. Impact of gamma radiations on wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties (Batoor and Janbaz) / Sajjad Ahmed et al // *Pure Appl. Biol.* 2017. 6 (1). P. 218–225.
171. Бессонова Л. А., Каменир Э. А. Поглощение рентгеновского излучения оболочками семян пшеницы // *Физиология и биохимия культурных растений.* 1991. Т. 23. № 6. С. 582–588.

172. Стимулирующий эффект лазерного излучения на начальные этапы онтогенеза пшеницы озимой / А. Н. Батын и др // Экологический вестник. 2017. № 2 (40). С. 123–128.

173. Гаджимусиева Н. Т. Асварова Т. А., Абдулаева А. С. Эффект воздействия инфракрасного и лазерного излучения на всхожесть семян пшеницы // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. Ч. 9. С. 1939–1943.

174. Goussous S. J. Samarah N. H., Alqudah A. M., Othman M. O. Enhancing seed germination of four crop species using an ultrasonic technique // Expl Agric. 2010. Vol. 46 (2). P. 231–242.

175. The influence of wheat *Triticum aestivum* L. seed pre-sowing treatment with magnetic fields on germination, seedling growth, and antioxidant potential under optimal soil watering and flooding / Balakhnina T. et al // Acta Physiologiae Plantarum. 2015. Vol. 37. № 3. P. 59.

176. Кондратенко Е. П., Соболева О. М., Егорова И. В., Вербицкая Н. В. Моделирование признаков посевных качеств семян пшеницы под влиянием электромагнитной обработки // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. № 2. С. 157–162.

177. Alicamanoglu S., Sen A. Stimulation of growth and some biochemical parameters by magnetic field in wheat (*Triticum aestivum* L.) tissue cultures // Afr. J. Biotechnol. 2011. Vol. 53. P. 10957–10963.

178. Жукова Т. А. Влияние длины волны лазерного излучения на эффективность прорастания семян и формирование ростка пшеницы // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития. 2017. С. 82–84.

179. Федотов В. А. Влияние параметров электротеплового излучения на фитосанитарное состояние семян пшеницы // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. 2 (12). С. 63–66.

180. Перспективы использования электротехнологии для повышения посевных качеств семян УФ-излучением / Кондратьева Н. П. и др // Известия Международной академии аграрного образования. 2015. № 24. С. 10–13.

181. Рогожин Ю. В., Рогожин В. В. Технология предпосевного УФ-облучения зерен пшеницы // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2013. № 6 (104). С. 9–14.
182. Симонова Е. Н. Активность пероксидазы и показателей перекисного окисления липидов в прорастающих семенах озимой пшеницы после УФ-облучения // Зерновое хозяйство России. 2017. № 6 (2017). С. 41–43.
183. Вплив ультрафіолетового випромінювання на проростання, схожість та ростові процеси насіння пшениці / Семенов А. О. та ін // Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2018. № 4(91). С. 70–75.
184. Семенов А. О. Особенности конструкции одноцокольных ламп для ультрафиолетового опроминення // Scientific Journal «ScienceRise». 2014. С. 64–67.
185. Новак Ж. М., Полянецька І. О. Схожість і енергія проростання зразків пшениці спельти // Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. 2016. Вип. 88 (1). С. 261–266.
186. Мухортов С. Я., Королев А. В. Влияние фитогормонов на рост, развитие и продуктивность столовой моркови // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2014. № 4. С. 52–56.
187. Kazuhiro Sugimoto. Seed germination under UV-B irradiation // Bull. Minamikyushu Univ. 2013. 43A. P. 1-9.
188. Nithia S. M. J., Shanthi N., Kulandaivelu G. Different responses to UV-B enhanced solar radiation in radish and carrot // Photosynthetica. 2005. Vol. 43. P. 307–311.
189. Короткова І. В., Семенов А. О., Маренич М. М., Сахно Т. В., Юрченко С. О. Вплив УФ-випромінювання різних діапазонів на передпосівні властивості моркви : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., присвяченої 90-річчю заснування кафедри землеробства і агрохімії ім. В. І. Сазанова факультету агротехнологій та екології «Актуальні питання землеробства і агрохімії: історія та сьогодення», 27-28 листопада 2018 р. Полтава : ПДАА, 2018. С. 78–80.

190. Державна фармакопея України. URL: <http://laco.eryb.floweracademy.ru/engine/b.php?> (дата звернення: 16.01.2018).
191. Семенов А. О., Кожушко Г. М., Сахно Т. В., Дугніст Л. В. Розробка технології бактерицидного знезараження активованого вугілля // Науковий вісник полтавського університету економіки і торгівлі: Сер. технічні науки. – 2017. 1 (83). С.75–84.
192. Семенов А. Кожушко Г., Сахно Т. Дослідження можливості мікробіологічного очищення активованого вугілля УФ-опроміненням : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», 30 січня–2 лютого 2018 р. Тернопіль – Яремча, 2018. С. 59–62.
193. Germicidal ultraviolet irradiation. Modern and effective methods to combat pathogenic microorganisms / Stephen B. и др. // ASHRAE JOURNAL. 2008. Vol. 50 (8). P. 18–20.
194. Семенов А. А. Ультрафиолетовое излучение для обеззараживания сыпучих пищевых продуктов // Вісник національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ «ХПІ». 2014. № 17 (1060). С. 25–30.
195. Пат. 93489 Україна, МПК A23L 3/26 (2006.01). Спосіб бактерицидного знезараження сипучих харчових продуктів / А. О. Семенов, Г. М. Кожушко, Л. В. Дугніст, Н. В. Семенова; замовник і патентовласник ВНЗ Укоопспілки «Полт. ун-т екон. і торг». – № 201401140; заявк. 06.02.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.
196. Пат. 2031585 Российская Федерация, МПК7 A23 B9/04, F26 B3/02, F26 B3/347. Способ тепловой обработки зерна / В. И. Анискин, Ю. К. Губиев, Р. К. Еркинбаева, О. Н. Налеев ; заявит. и патентообладатель: В. И. Анискин, Ю. К. Губиев, Р. К. Еркинбаева, О. Н. Налеев. – № 5060274/13 ; заявл. 25.08.1992 ; опубл. 27.03.1995.
197. Пат. 2124299 Российская Федерация, МПК7 A23 L1/025. Установка для обработки сыпучих продуктов облучением / Г. С. Зелинский, Э.

Е. Шевченко, Н. Н. Новиков, Л. Г. Приезжаева, А. Ф. Шухнов, Н. В. Карягин, В. И. Затолокин ; заявит. и патентообладатель: Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов переработки. – № 97119021/13 ; заявл. 04.11.1997 ; опубл. 10.01.1999.

198. Пат. 2157650 Российская Федерация, МПК7 A23 L3/025, A23 N17/00. Установка для обработки сыпучих продуктов облучением / В. М. Кулюкин, Е. В. Доброзракова, О. В. Кулюкин, В. А. Рязанова ; заявит. и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Энергопреобразующие и аккумулирующие системы» (ООО «ЭПАС»). – № 99112216/13 ; заявл. 07.06.1999 ; опубл. 20.10.2000.

199. Семенов А., Семенова Н. Бактерицидне знезараження сипких харчових продуктів / А. Семенов, // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія». – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2013. – №74. – С. 150–154.

200. Электрические облучательные установки фотобиологического действия / А. Б. Матвеев, С. М. Лебедкова, В. И. Петров ; под ред. С. П. Решенова – М.: МЭИ, 1989. 92 с.

201. Masschel I., Debacker E., Chebakbak S. Stude sur modele dela disinfection de lean par rayonement ultraviolet // Rev. sci. can. 1980. №2. P. 29–41.